

## ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ СТОЙКОСТЬ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ТОНКОСТЕННОГО ТОКОПРОВОДА К ВОЗДЕЙСТВИЮ БОЛЬШИХ ИМПУЛЬСНЫХ ТОКОВ

Баранов М.И., д.т.н.

НИПКИ «Молния» Национального технического университета

«Харьковский политехнический институт»

Украина, 61013, г. Харьков, ул. Шевченко, 47, НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ»

тел. (0572) 40-08-41, Факс (0572) 40-01-33, E-mail: nipkimolnija@kpi.kharkov.ua

*Запропоновано розрахункове співвідношення для наближеного визначення гранично допустимих амплітудних значень розрядного струму високовольтних електрофізичних установок у циліндричному тонкостінному струмопроводі за умовою забезпечення його електродинамічної стійкості. Результати, які одержані, можуть знайти практичне застосування в техніці сильних електричних та магнітних полів.*

*Предложено расчетное соотношение для приближенного определения предельно допустимых амплитудных значений разрядного тока высоковольтных электрофизических установок в цилиндрическом тонкостенном токопроводе по условию обеспечения его электродинамической стойкости. Полученные результаты могут найти практическое применение в технике сильных электрических и магнитных полей.*

### ВВЕДЕНИЕ

В высоковольтных электрофизических установках (ВЭФУ) с емкостными накопителями энергии (ЕНЭ), используемых для получения больших импульсных токов (БИТ) нано- и микросекундной длительности, широкое применение находят круглые трубчатые токопроводы из неферромагнитного материала с высокой удельной электропроводимостью (например, меди и алюминия) [1-3]. Известно, что при протекании по таким токопроводам аксиальных БИТ, вызывающих появление вокруг токопроводов азимутальных импульсных магнитных полей (ИМП), в результате электромагнитного взаимодействия тока токопровода с его собственным ИМП по аналогии с известными явлениями в канале сильноточного искрового разряда возникает пинч-эффект [2,4], приводящий к появлению в стенке токопровода радиально направленного к его центру магнитного давления  $P$ . В этом случае при определенных условиях стенка трубчатого токопровода будет не в состоянии противостоять сжимающему ее электро-динамическому усилию, что может приводить к упругой или пластической деформации токопровода, т.е. к потере его стенкой устойчивости и соответственно электродинамической стойкости. При рациональном проектировании указанных токопроводов разработчику необходимо выполнять требования как по минимизации их весогабаритных характеристик, так и по обеспечению электродинамической стойкости токопроводов к воздействию протекающих по ним БИТ амплитудой в десятки и сотни килоампер. Кроме того, аналогичные задачи требуется решать и при выборе круглых токоведущих частей высоковольтных электрических аппаратов, работающих в условиях кратковременного воздействия на них аварийных токов короткого замыкания промышленной частоты 50Гц амплитудой в десятки килоампер [5,6], а также при обеспечении электродинамической стойкости цилиндрических металлических оболочек, трубчатых элементов конструкции из алюминиевых сплавов и полых проводников силовых электрических цепей аэрокосмических объектов и электроэнергетических устройств к воздействию импульсных токов молнии микросекундной длительности амплитудой в десятки (сотни) килоампер [7,8].

Наблюдаемые на практике прямые удары молнии в летательные аппараты военного и гражданского назначения, вызывающие как отказы в работе бортового электро- и радиооборудования и навигационных приборов, так и разрушения их несущих металлических конструкций с катастрофическими последствиями для аппаратов в целом, являются неоспоримым тому подтверждением [9]. В настоящее время отсутствуют данные по выбору предельно допустимых амплитудных значений БИТ для цилиндрических трубчатых токопроводов по условию обеспечения их электродинамической стойкости.

Целью данной статьи является получение приближенного расчетного соотношения для выбора предельно допустимых амплитудных значений разрядного тока ВЭФУ с ЕНЭ в цилиндрических тонкостенных токопроводах, при протекании которого в аксиальном направлении последних обеспечивается их электродинамическая стойкость.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ПРИНЯТЫЕ ДОПУЩЕНИЯ

Рассмотрим в цилиндрической системе координат прямолинейный немагнитный трубчатый цилиндрический токопровод, жестко подсоединенный с обоих концов к элементам разрядной цепи ВЭФУ ЕНЭ (рис.1). На рис.1 приняты следующие обозначения: 1- исследуемый токопровод длиной  $\ell$  с наружным  $b$  и внутренним  $a$  радиусами и толщиной стенки  $h$ ; 2,3- массивные контактные элементы подсоединения торцов токопровода 1 к разрядной цепи ВЭФУ. Примем, что вдоль оси  $OZ$  рассматриваемого токопровода протекает разрядный ток  $i_p(t)$  ВЭФУ с ЕНЭ (см. стрелку на рис.1), амплитудно-временные параметры (АВП) которого описываются следующим известным выражением [3,10]:

$$i_p(t) = \beta_p I_m \exp(-\delta t) \cdot \sin \omega t, \quad (1)$$

где  $I_m$  – амплитуда первой полуволны разрядного тока ВЭФУ;  $\delta, \omega$  – соответственно коэффициент затухания и круговая частота разрядного тока ВЭФУ;  $\beta_\delta = [\exp(-\delta / \omega \cdot \arccctg \delta / \omega) \cdot \sin(\arccctg \delta / \omega)]^{-1}$  – нормирующий коэффициент.

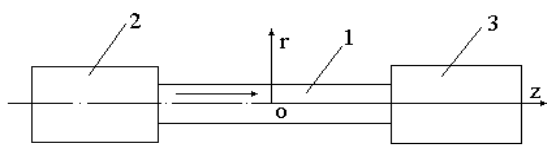


Рис.1

Считаем, что при анализе напряженно-деформированного состояния (НДС) цилиндрического тонкостенного токопровода выполняются следующие допущения: токопровод с геометрическими размерами  $l \gg b, h$  выполнен из изотропного немагнитного материала, физико-механические и электрофизические характеристики которого остаются неизменными в течение всего процесса воздействия на него БИТ [2]; магнитное давление  $P$  как в азимутальном, так и аксиальном направлениях длинного токопровода равномерно приложено к его наружной цилиндрической поверхности; материал токопровода удовлетворяет модели упругопластического тела [11]; влиянием торцевых зон подсоединения длинного токопровода к элементам разрядной цепи ВЭФУ на осевую и круговую неоднородность магнитного давления  $P$  пренебрегаем [2,3]. При рассматриваемом поперечном нагружении магнитным давлением  $P$  цилиндрической оболочки токопровода ее НДС будет симметрично относительно плоскости  $Z=0$  (рис.1). Требуется на основе анализа одномерного НДС исследуемого токопровода выполнить оценку его электродинамической стойкости к воздействию аксиальных БИТ, изменяющихся во времени  $t$  по зависимости (1).

#### РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТОКОПРОВОДА

Дифференциальное уравнение, описывающее процесс упругого сжатия длинного трубчатого тонкостенного токопровода его собственным азимутальным ИМП, запишем в следующем обобщенном виде [12]:

$$D \frac{d^4 r}{dz^4} + \frac{Ehr}{b^2} + P = 0, \quad (2)$$

где  $D = Eh^3 / [12(1-\nu^2)]$  – цилиндрическая жесткость токопровода;  $E, \nu$  – соответственно модуль упругости и коэффициент Пуассона для материала токопровода;  $r$  – радиальное перемещение стенки токопровода под действием ИМП в пределах ее малых (упругих) деформаций;  $P$  – магнитное давление, оказываемое ИМП на стенку токопровода.

Так как согласно принятым допущениям в рассматриваемом случае первый член в левой части уравнения (2) равен нулю, то из (2) для радиального перемещения стенки трубчатого токопровода получаем:

$$r = - \frac{pb^2}{Eh}. \quad (3)$$

Согласно [6] выражение для магнитного давления  $P$ , сжимающего исследуемый токопровод, имеет вид:

$$P = \frac{\mu_0 i_p^2}{8\pi^2 b^2}, \quad (4)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \tilde{A}i / i$  – магнитная постоянная.

Из (3), (4) и закона Гука [13] для максимального кольцевого механического напряжения  $\sigma_t$  в стенке рассматриваемого токопровода находим:

$$\sigma_t = - \frac{\mu_0 i_p^2}{8\pi^2 bh}. \quad (5)$$

#### ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМЫЕ ЗНАЧЕНИЯ БИТ ПО УСЛОВИЮ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ ТОКОПРОВОДА

Электродинамическая стойкость цилиндрического тонкостенного токопровода к воздействию аксиальных БИТ приближенно определяется из следующего условия [14]:

$$\sigma_t \leq [\sigma], \quad (6)$$

где  $[\sigma]$  – допускаемое значение кольцевого механического напряжения  $\sigma_t$  в материале токопровода.

С учетом требований правил устройства электроустановок (ПУЭ) применительно к их токоведущим частям выражение (6) в нашем случае принимает вид [15]:

$$\sigma_t \leq 0,7\sigma_\delta, \quad (7)$$

где  $\sigma_\delta$  – предел текучести материала токопровода (для меди в динамическом режиме нагружения  $\sigma_\delta = 19,6 \cdot 10^7 \text{Н/м}^2$  [1]).

Тогда из (1), (5) и (7) для предельно допустимых амплитудных значений БИТ  $I_{md}$ , протекающих в аксиальном направлении по цилиндрическому тонкостенному токопроводу и обеспечивающих его электродинамическую стойкость, получаем:

$$I_{md} \leq 7,43(\sigma_\delta bh / \mu_0)^{1/2}. \quad (8)$$

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальная проверка полученного расчетного соотношения (8) была выполнена при помощи ВЭФУ с ЕНЭ, основные электрические характеристики разрядной цепи которой ранее были приведены в [16]. На рис.2 приведен общий вид опытного образца цилиндрического тонкостенного алюминиевого ( $\sigma_\delta = 11,1 \cdot 10^7 \text{Н/м}^2$  [13]) токопровода, включаемого при электродинамических испытаниях в разрядную цепь ВЭФУ.

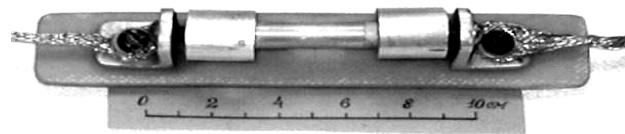


Рис.2

Для этой цели торцы опытного образца токопровода, к которым подводится аксиально направленный БИТ, были жестко закреплены в массивных металлических элементах конструкции токосъемника экспериментальной установки. В процессе экспериментальных исследований каждый опытный образец токопровода подвергался однократному воздействию БИТ, изменяющегося по закону экспоненциально затухающей синусоиды ( $\omega = 359 \text{кГц}$ ;  $\delta = 66,42 \cdot 10^3 \text{с}^{-1}$ ;  $\beta_\delta = 1,315$ ).

Измерение АВП тока в разрядной цепи ВЭФУ проводилось с помощью откалиброванного ленточного шунта, описанного в [16], экранированной кабельной линии передачи от шунта полезного электрического сигнала и осциллографа С8-13.

После протекания вдоль опытного образца токопровода заданного импульсного тока микрометром с точностью измерений 0,005мм проводилось определение его наружного диаметра  $2b$ . Выбор первоначальной амплитуды  $I_m$  тока, вводимой в опытный образец токопровода, осуществлялся на основании выражения (8) из неравенства  $I_m < I_{md}$ . В случае отсутствия в опытном образце остаточной (пластической) радиальной деформации сжатия, в качестве которой нами было выбрано перемещение  $\Delta r$  его стенки на каждую сторону токопровода, на образец ступенчато подавали новый импульс тока  $i_p$  вида (1) с увеличенной амплитудой  $I_m$ . При фиксации значений  $\Delta r$ , составляющих не более 1% от значения наружного радиуса  $b$  опытного образца токопровода, электродинамические испытания трубчатого токопровода прекращали. Измеренное при этом амплитудное значение тока  $I_m$  приближенно принималось за опытное предельно допустимое амплитудное значение БИТ  $I_{md}$  по условию обеспечения электродинамической стойкости исследуемого образца токопровода. Результаты проведенных экспериментов по проверке достоверности формулы (8) представлены в табл.1.

Таблица 1  
Результаты экспериментальной проверки  
расчетной формулы (8)

Геометрические параметры опытного образца алюминиевого токопровода	Амплитудное значение тока, кА		Опытное значение остаточной радиальной деформации токопровода $\Delta r$ , мм
	Предельно допустимое $I_{md}$ по формуле (8)	Предельно допустимое $I_{md}$ из эксперимента	
$b=5,45\text{мм};$ $h=0,5\text{мм};$ $\ell=50\text{мм}$	115	117	0,025
$b=5,25\text{мм};$ $h=0,25\text{мм};$ $\ell=50\text{мм}$	80	84	0,05

Из анализа полученных расчетных по формуле (8) и экспериментальных данных для  $I_{md}$  следует, что для исследуемого опытного образца токопровода расхождение между ними не превышает 5%. Это обстоятельство свидетельствует в пользу правомерности принятых допущений и работоспособности полученного расчетного соотношения (8) для определения предельных токовых значений  $I_{md}$ .

### ВЫВОДЫ

1. Сформулирован критерий электродинамической стойкости цилиндрического тонкостенного немагнитного токопровода к воздействию аксиально протекающих по нему БИТ, получаемых в разрядной цепи ВЭФУ с ЕНЭ.

2. Получено приближенное расчетное соотношение (8) для определения предельно допустимых амплитудных значений  $I_{md}$  разрядного тока ВЭФУ с ЕНЭ в цилиндрическом тонкостенном ферромагнитном токопроводе по условию обеспечения его

электродинамической стойкости, правомерность которого подтверждена результатами проведенных экспериментальных исследований.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Техника* больших импульсных токов и магнитных полей/ Под ред. В.С. Комелькова.-М.: Атомиздат, 1970.-472с.
- [2] *Кнопфель Г.* Сверхсильные импульсные магнитные поля.-М.: Мир, 1972.-391с.
- [3] *Михайлов В.М.* Импульсные электромагнитные поля.- Харьков: Вища школа, 1979.-140с.
- [4] *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда. М.: Наука, 1987.-592с.
- [5] *Александров Г.Н., Иванов В.Л.* Изоляция электрических аппаратов высокого напряжения.-Л.: Энергоатомиздат, 1984.-208с.
- [6] *Кузнецов И.Ф., Цицикян Г.Н.* Электро-динамические усилия в токоведущих частях электрических аппаратов и токопроводах. Л.: Энергоатомиздат, 1989.-176с.
- [7] *Баранов М.И., Бондина Н.Н.* Импульсное сопротивление цилиндрического провода с током молнии// *Технічна електродинаміка*.-1996.-№3.-С.3-9.
- [8] *Баранов М.И.* Термическая стойкость неизолированных проводов при прямом ударе молнии// *Технічна електродинаміка*.-1997.-№6.-С.9-15.
- [9] *Uman M.A.* Natural and artificially-initiated lightning and lightning test standards// *Proceeding of the IEEE*.-1988.-Vol. 76.-№12.-p.1548-1565.
- [10] *Баранов М.И.* Расчет процесса энерговыделения в цилиндрических токопроводах электрофизических установок высокого напряжения// *Электричество*.-1992.-№4.-С.6-10.
- [11] *Князев В.П., Шнейерсон Г.А.* Исследование быстрого расширения тонкостенных металлических цилиндров в сильном магнитном поле// *Журнал технической физики*.-1970.-т.40.-вып.2.-С.360-371.
- [12] *Тимошенко С.П., Войновский-Кригер С.* Пластинки и оболочки/ Пер. с англ. под ред. Г.С. Шапиро.-М.: ГИФМЛ, 1963.-635с.
- [13] *Сопротивление материалов/ Под общей ред. Г.С. Писаренко*.- Киев: Вища школа, 1973.-672с.
- [14] *Электротехнический справочник: Производство и распределение электрической энергии/ Под ред. И.Н. Орлова и др.*- М.: Энергоатомиздат, т.3, кн. 1, 1988.-880с.
- [15] *Правила устройства электроустановок*.-М.: Энергоатомиздат, 1986.-648с.
- [16] *Баранов М.И., Бондина Н.Н., Бочаров В.А.* Моделирование нелинейной электротепловой задачи для цилиндрических изотропных токопроводов электрофизических установок при получении больших импульсных токов// *Технічна електродинаміка*.-1998.-№4.-С.19-22.

Поступила 27.12.2002