

ВЕСТНИК НАЦИОНАЛЬНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА «ХПИ»

Сборник научных трудов
Тематический выпуск

39'2009

«ТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОФИЗИКА ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ»

Издание основано Национальным техническим университетом
«Харьковский политехнический институт» в 2001 году

Государственное издание

Свидетельство Госкомитета по информационной политике Украины

КВ № 5256 от 2 июля 2001 года

КООРДИНАЦИОННЫЙ СОВЕТ:

Председатель: Л.Л.Товажнянский, докт. техн. наук, проф.

Секретарь координационного совета: К.А.Горбунов, канд. техн. наук, доц.

А.П.Марченко, докт. техн. наук, проф.;
Е.И.Сокол, докт. техн. наук, проф.;
Е.Е.Александров, докт. техн. наук,
проф.;
Л.М.Бесов, докт. техн. наук, проф.;
А.В.Бойко, докт. техн. наук, проф.;
Ф.Ф.Гладкий, докт. техн. наук, проф.;
М.Д.Годлевский, докт. техн. наук, проф.;
А.И.Грабченко, докт.техн.наук, проф.;
В.Г.Данько, докт. техн. наук, проф.;
В.Д.Дмитриенко, докт. техн. наук, проф.;
И.Ф.Домнин, докт. техн. наук, проф.;
В.В.Епифанов, докт. техн. наук, проф.;
Ю.И.Зайцев, канд. техн. наук, проф.;
П.А.Качанов, докт. техн. наук, проф.;
В.Б.Клепиков, докт. техн. наук, проф.;

С.И.Кондрашов, докт.техн.наук, проф.;
В.М.Кошельник, докт.техн.наук,проф.;
В.И.Кравченко, докт.техн.наук, проф.;
Г.В.Лисачук, докт. хим. наук, проф.;
В.С.Лупиков, докт. техн. наук, проф.;
О.К.Морачковский, докт.техн.наук,проф.
В.И.Николаенко, докт.техн.наук, проф.;
П.Г.Перерва, докт. техн. наук, проф.;
В.А.Пуляев, докт.техн.наук, проф.;
М.И.Рыщенко, докт.техн.наук, проф.;
В.Б.Самородов, докт.техн.наук, проф.;
Г.М.Сучков, докт. техн.наук, проф.;
Ю.В.Тимофеев, докт.техн.наук, проф.;
Н.А.Ткачук, докт. техн.наук, проф.;

Харьков 2009

Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка і електрофізика високих напруг. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2009. № – 208 с.

В збірнику представлено теоретичні та практичні результати наукових досліджень та розробок, що виконані викладачами вищої школи, аспірантами, науковими співробітниками різних організацій та установ.

Для викладачів, наукових співробітників, спеціалістів.

В сборнике представлены теоретические и практические результаты исследований и разработок, выполненных преподавателями высшей школы, аспирантами, научными сотрудниками различных организаций и предприятий.

Для преподавателей, научных сотрудников, специалистов.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Ответственный редактор: В.И.Кравченко, докт.техн.наук, проф.

Ответственный секретарь: Л.В.Ваврив, канд.физ.-мат наук, с.н.с.

М.И.Баранов,	докт. техн. наук, с.н.с.;
Н.И.Бойко,	докт. техн. наук, доц.;
А.Г.Гурин,	докт. техн. наук, проф.;
Б.В.Клименко,	докт. техн. наук, проф.;
Г.М.Колиушко,	канд. техн. наук, с.н.с.;
В.С.Лупиков,	докт. техн. наук, доц.;
В.М.Михайлов,	докт. техн. наук, проф.;
В.В.Князев,	канд. техн. наук, с.н.с.;
Е.И.Сокол,	докт. техн. наук, проф.;
В.В.Рудаков,	докт. техн. наук, проф.;
И.В.Яковенко,	докт. техн. наук, с.н.с.

АДРЕС РЕДКОЛЛЕГИИ: 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21. НТУ «ХПИ». НИПКИ «Молния», Тел.(057)707-63-09

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».
Протокол № ... від 2009 р.

УДК 621.373.5

М.И.БАРАНОВ, докт.техн.наук, главн.науч.сотр., НТУ «ХПИ»;

В.В.ЛЕДЕНЕВ, канд.техн.наук, доцент, НТУ «ХПИ»;

А.С.СВИЧКАРЬ, магистр, НТУ «ХПИ»

ПРИБЛИЖЕННЫЙ РАСЧЕТ ПЕРЕХОДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОМИЧЕСКОГО ДЕЛИТЕЛЯ НАПЯЖЕНИЯ НА 1 МВ

Наведено результати теоретичного дослідження передатних властивостей омичного подільника напруги типу ОПН-1 на номінальну напругу 1 МВ.

The results of theoretical investigation of transferring properties of ohmic voltage divider of ODN-1 type on nominal voltage of 1 MV are given.

Введение

В [1,2] была описана конструкция омического делителя напряжения на номинальное напряжение 1 МВ (ОДН-1). Данный делитель состоит из высоковольтного и низковольтного плеч, двух экранов, изоляционной несущей конструкции и металлического основания-шасси. Экран, расположенный в верхней части делителя, состоит из двух торов диаметром 0,38 м и 0,99 м, которые расположены на расстоянии 0,54 м друг от друга и улучшают распределение электрического напряжения по высоте делителя. Экран, расположенный в нижней части делителя, представляет собой тор диаметром 0,85 м, предназначенный для создания распределенного потенциала земли в нижней части делителя. Изоляционная несущая конструкция делителя ОДН-1 состоит из четырех стеклопластиковых труб типа ТСПО длиной 0,652 м с внешним диаметром 0,12 м. В середине каждой стеклопластиковой трубы расположено 50 керамических резисторов типа ТВО-5-100 Ом, которые размещены на гетинаксовых пластинах длиной 0,633 м. Данные резисторы представляют собой высоковольтное плечо (ВП) делителя ОДН-1. Низковольтное плечо (НП) делителя ОДН-1 представляет собой два параллельно соединенных резистора типа МЛТ-2-1,8 Ом [1,2]. Общая высота омического делителя напряжения типа ОДН-1 составляет 3,02 м. Кроме того, в [1,2] были приведены результаты экспериментальных исследований данного высоковольтного делителя импульсного напряжения. Из проведенных с участием авторов экспериментов следует, что с помощью делителя ОДН-1 возможно надежно регистрировать аperiodические и синусоидальные испытательные импульсы микро- и миллисекундной длительности в сотни кВ, подаваемые на объект электрических испытаний. Определенный теоретический и практический интерес представляет задача, связанная с математическим исследованием передаточных свойств высоковольтного делителя импульсного напряжения типа ОДН-1.

1. Расчет паразитных электрических параметров омического делителя напряжения ОДН-1. Паразитными электрическими параметрами делителей напряжения, в том числе и омического делителя ОДН-1, как известно, являются [3]: его продольная емкость C_p , емкость относительно земли C_3 и индуктивность L .

Оценка емкостей делителя ОДН-1. Емкость относительно земли C_3 в исследуемом делителе ОДН-1 может быть приближенно рассчитана по следующей формуле [3]:

$$C_3 = \frac{2\pi\epsilon l_d}{\ln(2l_d/\sqrt{3}d_d)}, \quad (1)$$

где l_d – длина ОДН-1 ($l_d = 3,02$ м); d_d – диаметр ОДН-1 ($d_d = 0,12$ м).

Рассчитав C_3 по (1), получаем, что она в рассматриваемом электротехническом случае численно составляет $4,5 \cdot 10^{-11}$ Ф. Продольную емкость C_p делителя ОДН-1 рассчитаем по формуле, приведенной в [4]:

$$C_p = \frac{4\epsilon_0 a}{1 - \frac{2a}{p l_s} \left[1 - \frac{7}{12} \left(\frac{a}{l_s} \right)^2 + \frac{33}{40} \left(\frac{a}{l_s} \right)^4 \right]}, \quad (2)$$

где a – радиус верхнего экрана делителя ($a = 0,495$ м); l_s – расстояние от верхнего экрана делителя до земли ($l_s = 2,61$ м).

С учетом (2) имеем, что $C_p = 1,98 \cdot 10^{-11}$ Ф. Из [3] известно, что для равномерного распределения напряжения по длине делителя напряжения должно выполняться неравенство $C_p/C_3 \geq 3$. Так как данный делитель не имеет дополнительной продольной емкости C'_{pq} , то из уравнения $C_1 = C'_{pq} + C_p$ следует, что $C_1 = C_p$, где C_1 – емкость ВП делителя [3]. Используя приведенные выше количественные расчеты, оценим степень равномерности распределения напряжения по длине делителя. В качестве ее показателя используем соотношение C_p/C_3 , которое в нашем случае численно составит 0,442.

Оценка индуктивности делителя ОДН-1. Индуктивность ВП делителя ОДН-1 существенно превышает индуктивность его НП из-за большого количества последовательно включенных керамических резисторов, содержащихся в его ВП. Следовательно, индуктивностью НП можно практически пренебречь. Определим количественно индуктивность L ВП делителя типа ОДН-1. В [1,2] отмечено, что керамические резисторы в ВП размещены «елочкой» на гетинаксовых пластинах. Расчет индуктивности делителя при размещении резисторов в ВП «елочкой» является весьма трудоемкой задачей. Поэтому проведем приближенный расчет индуктивности L данного делителя.

При расчетах искомой индуктивности L делителя ОДН-1 представим каждый его резистор в виде прямолинейного отрезка металлического провода соответствующей длины (эквивалента резистора). Диаметр провода пусть будет

равен диаметру вывода резистора. Это можно допустить, так как внутри керамический резистор типа ТВО-5-100 Ом представляет собой графитовый стержень, равный по диаметру соответствующему размеру круглого металлического вывода данного резистора. Общую длину резистора с выводами примем равной 100 мм, из которой 77 мм составляет керамическое тело самого резистора и по 11,5 мм каждый из проволочных выводов резистора.

Индуктивность L делителя ОДН-1 найдем как среднее значение между индуктивностью при размещении резисторов его ВП в виде бифиляра L_{δ} (бифилярная намотка провода) и индуктивностью при размещении всех резисторов делителя в виде прямой линии $L_{нл}$.

Индуктивность L_{δ} рассчитаем по приведенной ниже формуле [5]:

$$L_{\delta} = \frac{m_0 l_{\delta}}{2p} \operatorname{Arch} \left(\frac{a}{d_p} \right), \quad (3)$$

где l_{δ} – общая длина резисторов с соединительными между ними проводниками ($l_{\delta} = 22,156$ м); d_p – диаметр проволочного вывода резистора ($d_p = 0,001$ м); a – расстояния между продольными осями соседних керамических резисторов ($a = 0,011$ м).

Длина проводов эквивалентов резисторов была рассчитана из следующих соображений: на гетинаксовой пластине длиной 0,633 м размещается 50 резисторов типа ТВО-5-100. Размеры каждого резистора составляют 12x8x77 мм. Если резисторы на пластине расположить параллельно друг другу (имитировать бифилярную намотку провода) равномерно по всей длине пластины, то расстояние между графитовыми стрежнями соседних резисторов окажется равным 11 мм. Как указывалось выше, длина резистора с выводами равна 100 мм. При размещении резисторов параллельно друг другу для их последовательного соединения необходимо 49 соединительных проводников длиной 0,011 м. Учитывая вышеизложенное, рассчитаем длину провода одной секции l_C ВП делителя по выражению: $l_C = 50 \cdot 0,1 + (49 \cdot 0,011) = 5,539$ м. Общая длина рассматриваемых проводов для четырех секций ВП делителя будет равна $l = 4l_C = 22,156$ м. Таким образом, искомая индуктивность $L_{\delta} = 13,7$ мкГн.

При размещении всех керамических резисторов делителя ОДН-1 в виде прямой линии индуктивность $L_{нл}$ рассчитаем по формуле [5]:

$$L_{нл} = \frac{m_0 l_{нл}}{2p} \left(\ln \frac{2l_{нл}}{r} - 1 \right), \quad (4)$$

где r – радиус провода ($r = 0,0005$ м); $l_{нл}$ – общая длина резисторов ($l_{нл} = 20$ м).

Тогда имеем, что $L_{нл} = 41,2$ мкГн. Количественно оценим индуктивность L делителя по формуле: $L = (L_{\delta} + L_{нл})/2$. Следовательно, $L = 27,45$ мкГн.

2. Расчет переходной характеристики омического делителя напряжения ОДН-1. Исследуем передаточные свойства делителя напряжения типа ОДН-1, которые можно описать с помощью его нормированной переходной характеристикой (НПХ). При теоретическом исследовании НПХ на вход ОДН-

1 будем подавать сигнал в виде единичного скачка напряжения (единичной функции Хевисайда) [3]. Для исследования НПХ в виде $g(t) = U_2(t) \cdot k/U_1(t)$, где k – коэффициент деления делителя, равный $k = (R_1 + R_2)/R_2 = 22220$ [1], воспользуемся упрощенной схемой замещения ОДН-1. Данная схема для делителя ОДН-1 может быть представлена в виде, приведенном на рис. 1 [3].

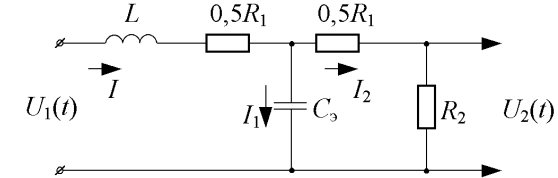


Рисунок 1 – Упрощенная схема замещения омического делителя напряжения ОДН – 1

На рис. 1 приняты следующие обозначения: R_1 – активное сопротивление ВП делителя; R_2 – активное сопротивление НП делителя; L – индуктивность ВП делителя; C_3 – эквивалентная емкость делителя. Расчет НПХ будем проводить при подаче на вход омического делителя ОДН-1 импульса напряжения в виде единичной ступенчатой функции Хевисайда, имеющей следующий вид [3]:

$$U_1(t) = 1(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0 \\ 1 & \text{при } t \geq 0 \end{cases}. \quad (5)$$

Эквивалентную емкость C_3 омического делителя высокого напряжения ОДН-1 рассчитаем по следующей формуле [3]:

$$C_3 = 0,43 \cdot C_3. \quad (6)$$

Из (6) следует, что исследуемом случае $C_3 = 1,935 \cdot 10^{-11}$ Ф. Далее запишем в операторной форме по Лапласу для упрощенной схемы замещения рассматриваемого делителя напряжения систему уравнений, описывающих электромагнитные процессы в омическом делителе ОДН-1:

$$\begin{cases} pL \cdot I(p) + 0,5R_1 \cdot I(p) + \frac{1}{pC_3} I_1(p) = U_1(p); \\ pL \cdot I(p) + 0,5R_1 \cdot I(p) + 0,5R_1 \cdot I_2(p) + R_2 \cdot I_2(p) = U_1(p); \\ I(p) = I_1(p) + I_2(p). \end{cases} \quad (7)$$

Величину тока, протекающего через резистор R_2 схемы на рис. 1, определим по следующей формуле:

$$I_2(p) = I(p) \cdot \frac{\frac{1}{pC_3}}{0,5R_1 + R_2 + \frac{1}{pC_3}}. \quad (8)$$

Общий ток $I(p)$ в (8) определим из следующего операторного выражения:

$$I(p) = \frac{U_1(p)}{(0,5R_1 + R_2) \cdot \frac{1}{pC_9} + 0,5R_1 + \frac{1}{0,5R_1 + R_2 + \frac{1}{pC_9}}}. \quad (9)$$

Из (8) и (9) следует, что ток $I_2(p)$ через резистор R_2 будет иметь вид:

$$I_2(p) = \frac{U_1(p)}{pC_9 \cdot (pL + 0,5R_1) \cdot \left(0,5R_1 + R_2 + \frac{1}{pC_9}\right) + 0,5R_1 + R_2}. \quad (10)$$

Напряжение на резисторе R_2 представим как:

$$U_2(p) = \frac{R_2 \cdot U_1(p)}{pC_9 \cdot (pL + 0,5R_1) \cdot \left(0,5R_1 + R_2 + \frac{1}{pC_9}\right) + 0,5R_1 + R_2} = \frac{4R_2 \cdot U_1(p)}{2LC_9(R_1 + 2R_2)p^2 + (4L + C_9R_1(R_1 + 2R_2))p + 4(R_1 + R_2)}. \quad (11)$$

Операторное изображение выходного напряжения $U_2(p)$ согласно (11) можно представить в следующем компактном виде:

$$U_2(p) = \frac{4R_2 \cdot U_1(p)}{ap^2 + bp + c}, \quad (12)$$

где $U_1(p) = 1/p$ – изображение единичного скачка напряжения на входе делителя ОДН–1; $a = 2LC_9(R_1 + 2R_2)$; $b = 4L + C_9R_1(R_1 + 2R_2)$; $c = 4(R_1 + R_2)$.

Оригинал выходного напряжения $U_2(t)$ найдем при помощи теоремы разложения [6]. Для этого представим выражение для $U_2(p)$ в виде:

$$U_2(p) = \frac{f_1(p)}{p \cdot f_2(p)}, \quad (13)$$

где $f_1(p) = 4R_2$; $f_2(p)$ – функция, отображающая характеристическое уравнение, имеющее следующий вид $f_2(p) = ap^2 + bp + c$.

Так как один из корней знаменателя в выражении (13) для $U_2(p)$ является нулевым, то оригинал выходного напряжения $U_2(t)$ будет иметь следующий аналитический вид:

$$U_2(t) = \frac{f_1(0)}{f_2(0)} + \sum_{i=1}^2 \frac{f_1(p_i)}{p \cdot f_2'(p_i)} e^{p_i t}, \quad (14)$$

где p_i – корни характеристического уравнения вида $f_2(p) = ap^2 + bp + c$.

Корни характеристического уравнения вида $f_2(p)$ в (13) равны:

$$p_1 = -\frac{b}{2a} + \frac{\sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}; \quad p_2 = -\frac{b}{2a} - \frac{\sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}. \quad (15)$$

Из (13) и (15) видно, что значения числителя и производной знаменателя для оригинала выходного напряжения $U_2(t)$ имеют вид:

$$f_1(0) = 4R_2; \quad (16)$$

$$f_2(0) = 4(R_1 + R_2); \quad (17)$$

$$f_1(p_1) = 4R_2; \quad (18)$$

$$f_2'(p_1) = \frac{b^2 - 4ac - b\sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}; \quad (19)$$

$$f_1(p_2) = 4R_2; \quad (20)$$

$$f_2'(p_2) = \frac{b^2 - 4ac + b\sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}. \quad (21)$$

Тогда, оригинал напряжения $U_2(t)$ на выходе делителя ОДН–1, при подаче на его вход единичного скачка напряжения $U_1(t) = l(t)$, имеет вид:

$$U_2(t) = \frac{R_2}{R_1 + R_2} + \frac{8R_2 \cdot a}{b^2 - 4ac - b\sqrt{b^2 - 4ac}} \exp\left[\left(-\frac{b}{2a} + \frac{\sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}\right)t\right] + \frac{8R_2 \cdot a}{b^2 - 4ac + b\sqrt{b^2 - 4ac}} \exp\left[-\left(\frac{b}{2a} + \frac{\sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}\right)t\right]. \quad (22)$$

Из (22) следует, что в предельном случае $\lim_{t \rightarrow 0} U_2(t) = 0$ и $\lim_{t \rightarrow \infty} U_2(t) = 1/k$.

В дальнейшем используем следующие электрические параметры исследуемого делителя ОДН–1: $R_1 = 20$ кОм; $R_2 = 0,9$ Ом; $C_9 = 1,935 \cdot 10^{-11}$ Ф; $L = 27,45$ мкГн; $a = 2,1248 \cdot 10^{-11}$ Ом·с²; $b = 7,85 \cdot 10^{-3}$ Ом·с; $c = 80003,6$ Ом. При указанных параметрах получим оригинал выходного напряжения $U_2(t)$ в виде:

$$U_2(t) = 4,5 \cdot 10^{-5} + 0,1354 \cdot 10^{-5} e^{-3,59 \cdot 10^8 t} - 4,635 \cdot 10^{-5} e^{-1,049 \cdot 10^7 t}. \quad (23)$$

В результате для НПХ исследуемого омического делителя напряжения ОДН–1, представленной нами соотношением $g(t) = U_2(t) \cdot k/U_1(t)$, может быть построена кривая, приведенная в безразмерном виде на рис. 2.

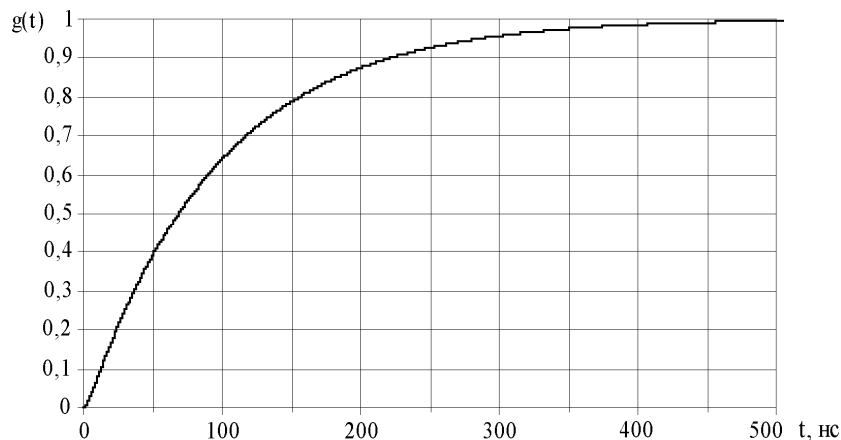


Рисунок 2. НПХ для омического делителя напряжения ОДН–1

Из расчетной кривой НПХ, представленной на рис. 2, следует, что собственное время нарастания НПХ (время, в течение которого численное значение НПХ изменяется между уровнями 0,1–0,9 от своего максимального значения), для исследуемого высоковольтного омического делителя напряжения типа ОДН–1 составляет примерно 209 нс.

Известно, что для достоверной и надежной регистрации быстроизменяющихся импульсов напряжения необходимо, чтобы собственное время нарастания измерительного прибора было на порядок меньше времени нарастания измеряемого импульсного сигнала [3]. Таким образом, с помощью рассматриваемого высоковольтного омического делителя напряжения ОДН–1, созданного в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» в отделе электромагнитных испытаний, можно уверенно регистрировать испытательные импульсы напряжения микро- и миллисекундной длительности. Отметим, что эти расчетные результаты хорошо согласуются с данными экспериментальных исследований омического делителя напряжения ОДН–1, которые приведены в [1,2].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Приведен приближенный расчет паразитных электрических параметров высоковольтного омического делителя напряжения типа ОДН–1 на номинальное входное напряжение 1 МВ. Из выполненных расчетов следует, что емкость относительно земли C_3 в делителе ОДН–1 составляет $4,5 \cdot 10^{-11}$ Ф, а продольная емкость исследуемого делителя C_p равна $1,98 \cdot 10^{-11}$ Ф. При определении полной индуктивности делителя ОДН–1 индуктивностью его НП можно пренебрегать. Определение паразитной индуктивности при расположении керамических резисторов типа ТВО-5-100 Ом в его ВП «елочкой» является весьма трудоемкой задачей. Поэтому индуктивность ВП исследуемого делителя можно опре-

делять как среднее арифметическое между индуктивностями при расположении его керамических резисторов типа ТВО-5-100 Ом в ВП в виде бифиляра и в виде прямолинейных отрезков металлического проводника соответствующих геометрических размеров. С учетом такого приближенного подхода расчетное значение индуктивности L высокоомного делителя напряжения типа ОДН–1 численно составляет 27,45 мкГн.

2. Расчетное собственное время нарастания НПХ высоковольтного омического делителя напряжения типа ОДН–1 равно около 209 нс.

3. Исследуемый высоковольтный омический делитель напряжения типа ОДН–1 может быть использован в качестве рабочего измерительного средства при измерении в лабораторных условиях быстро изменяющихся апериодических и синусоидальных импульсов напряжения микро- и миллисекундной длительности с уровнем амплитуды до 1 МВ.

Список литературы: 1. Баранов М.И., Бочаров В.А., Зиньковский В.М. и др. Омический делитель напряжения для измерения испытательных грозовых и коммутационных импульсов амплитудой до 1 МВ // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка і електрофізика високих напруг. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2007. – № 20. – С. 20-30. 2. Баранов М.И., Свічкарь О.С. Електрофізичні особливості розробки і створення високоомного подільника напруги на 1 МВ // Матеріали XVI міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (4 – 6 червня 2008 р., м. Харків). – ч. 2, Харків: НТУ «ХПІ», 2008. – С. 342. 3. Шваб А. Измерения на высоком напряжении: Измерительные приборы и способы измерения / Пер. с нем. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 264 с. 4. Иосель Ю. Я., Кочанов Э. С., Струнский М. Г. Расчет электрической емкости. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 288 с. 5. Калантаров П. Л., Цейтлин Л. А. Расчет индуктивностей: Справочная книга. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 488 с. 6. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи: Учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 1984. – 559 с.

Поступила в редколлегию 09.11.2009

УДК 621.3:537.3

М.И.БАРАНОВ, докт.техн.наук, главн.науч.сотр., НТУ «ХПИ»;
В.О.ЛЫСЕНКО, аспирант, НТУ «ХПИ»

ПРИБЛИЖЕННЫЕ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ ДРЕВЕСИНЫ В АТМОСФЕРНОМ ВОЗДУХЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПРЯМОГО УДАРА В НЕЕ ЛИНЕЙНОЙ МОЛНИИ

Надані дві спрощені розрахункові електродинамічні моделі руйнування деревини і результати наближеного оцінювання за ними механічного напруженого стану деревини сосни, яка зазнає прямий удар лінійної блискавки та подовжене розповсюдження нею сильноточного низькотемпературного плазмового каналу. Показано, що електродинамічна дія лінійної блискавки на вказану деревину може приводити до її механічного радіального розколювання.

Two the simplified calculation electrodynamic models of destruction of wood and results of approximate estimation of their mechanical tense state of pine-tree wood, by a testing line blow of linear lightning and longitudinal distribution on it of its heavy-current low temperature plasma channel are given. It is shown that the electrodynamic effects of linear lightning on the specified linear wood can result in its mechanical radial cleaving.

ВВЕДЕНИЕ. В области инженерной электрофизики, а также в технике высоких напряжений (ТВН) и больших импульсных токов (БИТ) при создании мощных электрофизических установок (ЭФУ) на рабочие импульсные напряжения порядка 1 МВ и токи до 1 МА нашла практическое применение наружная изоляция, базирующаяся на древесине хвойных пород [1–3]. Кроме того, во всем мире при возведении многих строительных конструкций технических зданий и сооружений также используется древесина разных пород [4]. Наиболее широкое распространение при этом в строительной индустрии, ТВН, технике БИТ и их ЭФУ получили конструкции, основанные на клееной древесине – деревянные клееные конструкции (ДКК) [1–3]. Размеры таких ДКК, изготовленных, в основном, из древесины хвойных пород и расположенных на открытом воздухе, зачастую составляют, прежде всего по их высоте, десятки метров. В связи с этим появляется реальная угроза их поражения в воздушной атмосфере прямым ударом молнии (ПУМ), среднестатистические амплитудно-временные параметры (АВП) импульсной компоненты тока которой характеризуются уровнями в десятки (сотни) килоампер при ее фронте от единиц до десятков микросекунд и полной длительности до сотен микросекунд [5]. Электротепловые и электродинамические процессы, протекающие в древесине как ДКК технических зданий и сооружений, так и природных объектов – деревьев (рис. 1 и 2 [6,7]) при ее поражении ПУМ, в настоящее время остаются практически не исследованными. Поэтому несомненный научный и практический интерес как для электрофизики молнии, так и указанной техники при оценке ее стойкости к действию ПУМ с заданными АВП тока молнии представляет изучение в упомянутой древесине таких процессов, имеющих электрофизическую природу.

Заметим, что приведенное на рис.1 электрофизическое событие поражения летом ПУМ дерева лиственной породы было зафиксировано иностранными исследователями линейной молнии [6], а на рис.2 – отечественными специалистами во время также летней грозы (г. Макеевка, Украина, 2008 год [7]).



Рисунок 1 – Общий вид ПУМ в отдельно стоящее в поле дерево [6]



Рисунок 2 – Результаты воздействия ПУМ в условиях города на тополь [7]

1. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О СТРОЕНИИ И НЕКОТОРЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВАХ ДРЕВЕСИНЫ

Начнем с того, что древесиной принято называть волокнистую ткань, содержащуюся в стволе дерева любой породы, освобожденном от его коры [8]. Ствол дерева состоит из растительных клеток разной формы и величины, имеющих разное назначение в растущем («живом») дереве. Макроструктуру ствола можно хорошо рассмотреть на его торцевом срезе (рис. 3), где четко видны: *кора*, *камбий* и *древесина*. *Кора* состоит из наружной кожицы, пробкового слоя под ней и луба – внутреннего слоя, под которым у растущего дерева находится *камбий* – тонкий слой, состоящий из размножающихся делением «живых» растительных клеток. *Древесина* деревьев различных пород состоит из вытянутых вдоль ствола дерева веретенообразных клеток – пустотелых ячеек, стенки которых состоят из целлюлозы – природного линейного высокомолекулярного полимера [8]. Камбий ежегодно в вегетативный период для дерева (весна – осень) откладывает внутрь его ствола основную часть клеток ранней древесины. Поэтому древесина состоит из ряда концентрических годовых колец (см. рис. 3). Со временем клетки внутренних колец древесины отмирают и полые трахеиды поздней древесины сохнут и значительно уменьшаются в своих поперечных размерах. С учетом отмеченного выше во Введении остановимся лишь на микроскопическом строении древесины хвойных пород.



Рисунок 3 – Типичный вид торцевого среза высушенной на воздухе при комнатной температуре древесины, подвергшейся естественному процессу разрушения (раскалыванию) из-за своего радиального трещинообразования

Клетки древесины хвойных пород (ель, сосна, лиственница, кедр и пихта) состоят, главным образом, из пустотелых трахеид овальной формы, приближающейся к прямоугольной и квадратной конфигурациям с закругленными углами [8]. На долю таких трахеид в рассматриваемой породе деревьев приходится до 95 % общего объема древесины. В растущем дереве по этим вертикально расположенным полым трахеидам – капиллярным сосудам, сообщаемым между собой с помощью микроскопических отверстий, передвигается влага с растворенными в ней химическими соединениями от корней к его кроне. Геометрические размеры отдельных полых трахеид, например, для сосны, могут принимать следующие численные значения [9]: ширина $b_T = 44,6$ мкм; толщина стенки $h_T = 4,3$ мкм; длина $l_T = 3,25$ мм. Между собой рассматриваемые полые трахеиды сосны и других хвойных пород деревьев скреплены при помощи лигнина [10], выполняющего в древесине функцию склеивающего вещества. Благодаря лигниновым прослойкам в хвойных породах деревьев обеспечивается механическая прочность их древесины при ее растяжении поперек своих волокон (полых трахеид со склеенными со всех сторон стенками из высокопрочных продольно ориентированных волокон целлюлозы) и при ее радиальном раскалывании, а также при ее продольном скалывании вдоль указанных волокон древесины. Что касается известных основных физико-механических свойств древесины хвойных пород, то, например, для сосны согласно [11] временное сопротивление раскалыванию σ_p по радиальной плоскости древесины составляет около 4,11 МПа, временное сопротивление продоль-

ному сжатию (вдоль волокон древесины) $\sigma_c = 45,8$ МПа, а временное сопротивление поперечному статическому изгибу (поперек волокон древесины) $\sigma_u = 87,3$ МПа.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ ДРЕВЕСИНЫ ПРИ ПУМ

Рассмотрим растущую или «живую» древесину такого представителя хвойных пород как растущей сосны, испытывающую в атмосферном воздухе при нормальных условиях (при давлении $p_0 = 1,013 \cdot 10^5$ Па и температуре $T_0 = 0$ °C [12]) воздействие ПУМ. Примем, что при ПУМ в древесину сосны по круглому цилиндрическому плазменному каналу молнии наружным радиусом r_{0m} протекает униполярный импульс грозового тока $i_L(t)$, зависимость которого во времени t описывается следующим аналитическим выражением [13]:

$$i_L(t) = \beta_m I_{mL} [\exp(-a_1 t) - \exp(-a_2 t)], \quad (1)$$

где I_{mL} – амплитуда аperiodического импульса тока молнии; a_1 и a_2 – коэффициенты временной формы тока молнии ($a_1 \approx 0,76/\tau_p$; $a_2 \approx 2,37/\tau_f$; τ_f и τ_p – соответственно длительность фронта и длительность импульса тока молнии);

$\beta_m = \left[(a_1 / a_2)^{a_1/(a_2-a_1)} - (a_1 / a_2)^{a_2/(a_2-a_1)} \right]^{-1}$ – нормирующий коэффициент для принятой временной формы импульса тока молнии.

Считаем, что при ПУМ после привязки указанного канала молнии к исследуемой древесине импульсный ток согласно (1) протекает по наиболее увлажненным трахеидам ранней древесины сосны, прилегающим к камбию ствола рассматриваемой породы дерева. Данные трахеиды сосны будут иметь наибольшую электрическую проводимость и поэтому они в поперечном сечении ствола древесины будут характеризоваться наименьшей продольной электрической прочностью. Именно их электрическая прочность и будет определять электрическую прочность древесины сосны в целом. В пользу такого допущения свидетельствуют результаты реального воздействия линейной молнии, приведенные на рис. 2. Пусть временная форма аperiodического импульса тока молнии $i_L(t)$ по (1) характеризуется длительностью фронта $\tau_f = 2$ мкс и длительностью токового импульса на половине его амплитуды $I_{mL} = 100$ кА, равной $\tau_p = 50$ мкс [13]. Тогда, время t_{mL} , соответствующее данной амплитуде

I_{mL} тока молнии, будет равным $t_{mL} = \ln(a_2 / a_1) \cdot (a_2 - a_1)^{-1} = 3,71$ мкс [14].

Полагаем, что поперечное сечение трахеиды древесины сосны длиной l_T можно приближенно представить в виде поперечного сечения полого цилиндра с толщиной стенки, равной $h_T = (R_2 - R_1)$. На рис. 4 в цилиндрической системе координат приведена принятая нами расчетная конструкция отдельной трахеиды сосны, испытывающей воздействие ПУМ и продольное растекание вдоль нее определенной части аperiodического импульса тока молнии согласно (1).

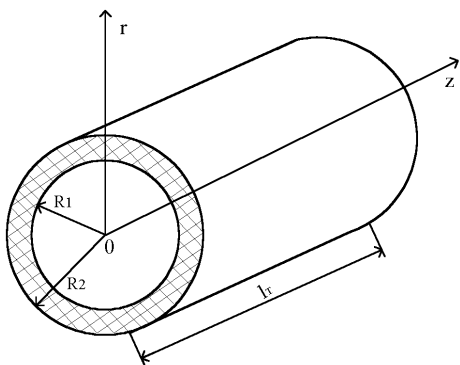


Рисунок 4 – Расчетная конструкция круглой полой цилиндрической трахеиды древесины сосны, испытывающей при ПУМ продольное воздействие тока линейной молнии

Напряженное состояние при ПУМ круглой полой трахеиды древесины сосны с током молнии, протекающим вдоль ее влаги, сосредоточенной внутри ее полого цилиндрического объема $V_T = \pi R_1^2 l_T$, определяем с учетом только наличия нормальных сил в ее тонкой стенке из целлюлозы и при условии пренебрежения изгибающими моментами в трахеиде древесины. Так как края и бока исследуемой трахеиды древесины достаточно жестко защемлены снизу, сверху и с ее боковой поверхности в цилиндрическом объеме древесины растущей сосны, то данное допущение будет практически выполняться в реальных условиях воздействия на нее ПУМ и соответственно импульсного тока молнии (1).

3. ПРИБЛИЖЕННЫЕ РАСЧЕТНЫЕ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ ДРЕВЕСИНЫ ПРИ ПУМ

1. Пародинамическая модель разрушения древесины. На основе безмоментной теории цилиндрических оболочек [15] рассмотрим в цилиндрической системе координат при ПУМ напряженное состояние круглой тонкостенной трахеиды древесины сосны с протекающим внутри ее полого и заполненного влагой цилиндрического объема импульсом тока линейной молнии (1) с указанными АВП. Для этого в тонкой целлюлозной стенке исследуемой цилиндрической трахеиды древесины выделим малый элемент, показанный на рис. 5.

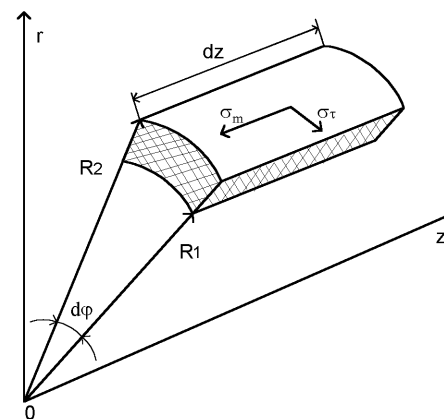


Рисунок 5 – Расчетный элемент круглой полой цилиндрической трахеиды древесины сосны с током линейной молнии для определения при ПУМ напряженного состояния ее стенки

С учетом принятых допущений на выделенный элемент тонкой стенки трахеиды древесины при ПУМ будут действовать только главные нормальные механические напряжения (см. рис. 5), которые обозначим следующим образом: σ_m – меридиональное напряжение (действует вдоль продольной оси трахеиды) и σ_τ – тангенциальное напряжение (действует вдоль окружности трахеиды). В соответствии с положениями безмоментной теории цилиндрических оболочек данные механические напряжения будут распределены равномерно по толщине h_T стенки рассматриваемой трахеиды и ее выделенного элемента [15]. Воспользовавшись уравнением Лапласа из области гидродинамики [16], полученным еще в начале 19-го столетия при изучении поверхностного натяжения в жидкостях, можно показать, что в рассматриваемом случае для нормальных напряжений σ_m и σ_τ на срединной поверхности в выделенном элементе стенки трахеиды древесины при протекании вдоль нее части тока молнии вида 2/50 мкс будут справедливы следующие аналитические соотношения:

$$\sigma_m = p(R_1 + R_2) / 4(R_2 - R_1); \quad (2)$$

$$\sigma_\tau = p(R_1 + R_2) / 2(R_2 - R_1), \quad (3)$$

где p – избыточное давление, симметрично действующее изнутри на тонкую целлюлозную стенку цилиндрической трахеиды древесины.

Из (2) и (3) следует, что при ПУМ тангенциальное напряжение σ_τ , растягивающее стенку трахеиды древесины по окружности, в два раза превышает меридиональное напряжение σ_m , действующее вдоль образующей круглой тонкой цилиндрической трахеиды древесины сосны и иных хвойных пород. В рамках пародинамической модели разрушения древесины при ПУМ считаем [17], что давление p для (2) и (3) внутри полого цилиндрического объема ее трахеиды создается за счет интенсивного джоулева нагрева и высокоскорост-

ного испарения влаги, содержащейся в указанном внутреннем объеме трахеиды. Учитывая быстропотекающий (взрывной) характер воздействия ПУМ на стадии протекания импульсной компоненты (1) тока молнии на исследуемую древесину (в течение сотен микросекунд [14]), можно величину внутреннего объема V_T трахеиды древесины принять неизменной во время протекания вдоль нее части импульса тока молнии $i_L(t)$. Тогда для абсолютного давления p_1 внутри полой трахеиды древесины при рассмотрении пародинамической модели ее разрушения при ПУМ запишем следующее выражение [18]:

$$p_1 = p_0 (1 + \alpha_p T), \quad (4)$$

где $\alpha_p = (273,15)^{-1}$ – термодинамический коэффициент давления, $(^\circ\text{C})^{-1}$; T – температура газа (водяного пара) внутри полой трахеиды древесины, $^\circ\text{C}$.

Из (4) видно, что давление p_1 внутри трахеиды древесины сосны прямо пропорционально температуре возникающего в ее полой цилиндрическом объеме V_T газа (перегретого водяного пара). Так, согласно (4) при $T = 100^\circ\text{C}$ избыточное давление $(p_1 - p_0)$ водяного пара принимает численное значение, равное $0,37 \cdot 10^5$ Па, при $T = 1000^\circ\text{C}$ – $3,71 \cdot 10^5$ Па, а при $T = 12000^\circ\text{C}$ – $44,5 \cdot 10^5$ Па. Заметим, что в последнем случае возникающее избыточное давление $(p_1 - p_0) = 4,45$ МПа внутри трахеиды древесины превышает временное сопротивление раскалыванию $\sigma_p = 4,11$ МПа по радиальной плоскости древесины сосны [11]. Для рассматриваемой трахеиды древесины сосны с учетом (4) при $R_2 = b_T/2 = 22,3$ мкм, $R_1 = 18$ мкм, $h_T = 4,3$ мкм, $T = 2500^\circ\text{C}$ и $(p_1 - p_0) = 9,27 \cdot 10^5$ Па согласно (3) тангенциальное напряжение σ_τ в ее стенке оказывается равным 4,34 МПа. Данное механическое напряжение в тонкой целлюлозной стенке трахеиды сосны становится больше, чем указанное выше ее временное сопротивление раскалыванию $\sigma_p = 4,11$ МПа [11]. Поэтому уровень температуры T в несколько тысяч градусов Цельсия для газа (водяного пара), образовавшегося в зоне камбия внутри тонкостенной цилиндрической трахеиды древесины сосны от прохождения по ней импульса тока линейной молнии $i_L(t)$, будет приводить к ее высокоскоростному электродинамическому разрушению. Об этом качественно свидетельствуют и данные разрушения при ПУМ древесины тополя на рис. 2. Такое взрывообразное разрушение множества склеенных слабопрочным лигнином друг с другом целлюлозных стенок полых трахеид древесины, оказавшихся в зоне действия ПУМ, будет вызывать радиальное раскалывание молнией круглого ствола дерева сосны или иной хвойной породы.

2. Плазмодинамическая модель разрушения древесины. Рассмотрим далее другую возможную модель электродинамического разрушения при ПУМ древесины, основанную на воздействии низкотемпературной плазмы канала линейной молнии на исследуемую цилиндрическую трахеиду сосны. Прохождение тока линейной молнии по рассматриваемой древесине, поражаемой действием ПУМ, связано с непосредственным распространением вдоль ее полых

трахеид с их внутренней влагой сильноточного плазменного канала линейной молнии. Известно, что внутри сильноточного цилиндрического плазменного канала линейной молнии при учете проявления в нем пинч-эффекта газодинамическое давление p_2 описывается следующей известной формулой [13,14]:

$$p_2 = \frac{m_0 i_L^2(t)}{8\pi^2 r_{0m}^2} \left[2 - \left(\frac{r}{r_{0m}} \right)^2 \right], \quad (5)$$

где r_{0m} – внешний радиус плазменного канала молнии; $0 \leq r \leq r_{0m}$ – текущий радиус плазменного канала молнии; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная.

Из (5) видно, что в рассматриваемом канале молнии наибольшее значение газодинамического давления p_2 будет наблюдаться при амплитуде ее тока I_{mL} на его оси ($r = 0$). В этой связи при рассмотрении здесь плазмодинамической модели разрушения молнией древесины сосны (хвойных пород) вначале примем, что исследуемая уединенная тонкостенная цилиндрическая трахеида древесины сосны находится в центре плазменного канала тока молнии ($r = 0$), являющемся наиболее электродинамически и соответственно механически напряженным при ПУМ местом древесины. Для определения в (5) величины r_{0m} воспользуемся известным расчетным выражением, вытекающим из формулы Брагинского для радиуса сильноточного канала электрического разряда в атмосферном воздухе при принятых нами в нем нормальных условиях [19]:

$$r_{0m} = 0,093(I_{mL})^{1/3} \cdot (t_{mL})^{1/2}. \quad (6)$$

При $I_{mL} = 100$ кА и $t_{mL} = 3,71$ мкс из (6) получаем, что $r_{0m} = 8,31$ мм. Тогда в рассматриваемом идеализированном случае, не учитывающем влияние протекания части тока молнии по соседним с исследуемой трахеидой и кольцевым образом окружающим ее другим трахеидам древесины, из (5) при $r = 0$; $i_L(t) = I_{mL} = 100$ кА и $r_{0m} = 8,31$ мм находим, что газодинамическое давление p_2 внутри уединенной полой трахеиды сосны составит 4,61 МПа. При этом избыточное давление $(p_2 - p_0)$ внутри такой уединенной трахеиды может оказаться примерно равным 4,51 МПа. В соответствии с [11] это давление внутри трахеиды будет превышать временное сопротивление раскалыванию $\sigma_p = 4,11$ МПа для древесины сосны. Заметим, что на краю плазменного канала молнии ($r = r_{0m}$) согласно (5) при указанных АВП для импульса тока молнии избыточное давление $(p_2 - p_0)$ внутри исследуемой уединенной трахеиды древесины составит около 2,21 МПа. Данное давление в соответствии с (3) вызовет появление в целлюлозной стенке этой трахеиды сосны тангенциального механического напряжения σ_τ , равного около 10,3 МПа и превышающего значение σ_p . Поэтому можно достаточно обоснованно заключить, что при ПУМ в древесину сосны давление плазмы сильноточного канала молнии в зонах своей привязки и протекания вдоль ее полых цилиндрических трахеид грозового тока вида (1) с принятыми АВП достигает уровней, достаточных для электродинамического разрушения древесины сосны путем ее радиального раскалывания.

ВЫВОДЫ

1. Приведены результаты электрофизических исследований, связанных с оценкой давлений и нормальных механических напряжений, возникающих в уединенной круглой цилиндрической тонкостенной трахеиде древесины сосны при ПУМ в указанную древесину и продольном протекании внутри этой целлюлозной трахеиды с влагой импульсной компоненты тока молнии 2/50 мкс.
2. На основании двух разработанных электродинамических моделей разрушения при ПУМ древесины расчетным путем впервые показано, что линейная молния может вызывать радиальное раскалывание древесины сосны.

Список литературы: 1. Баранов М.И., Колиушко Г.М., Кравченко В.И. и др. Комплекс высоковольтного испытательного электрофизического оборудования экспериментальной базы НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Електроенергетика та перетворююча техніка. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2004. – № 4. – С. 3-13. 2. Рудаков В.В., Недзельский О.С.. Исследование импульсной электрической прочности крупногабаритных клееных деревянных конструкций // Вестник ХПИ. Серия «Электроэнергетика и автоматизация энергоустановок». – Харьков: ХПИ. – 1993. – Вып. 18. – С. 73-77. 3. *International standard IEC 61000-4-32. Part 4-32: Testing and measurement techniques-High-altitude electromagnetic pulse (HEMP) simulator compendium.* – Geneva, Switzerland, 2002. – 108 p. 4. *Slitskouhov Yu., Budanov V., Garpoev M. et el.* Wooden and Plastic Structures. – М.: Mir Publishers, 1989. – 400 p. 5. Баранов М.И., Носенко М.А. Исследование термического действия тока искусственной молнии на образцы металлической обшивки летательного аппарата авиационной техники // Инженерно-физический журнал. – 2009. – Том 82. – № 5. – С. 972-980. 6. [http:// www.poster cartel.com/ fr/ 1700-4570.aspx?o=2300-8501](http://www.poster cartel.com/ fr/ 1700-4570.aspx?o=2300-8501). 7. <http:// ru.wikipedia.org/wiki/молния>. 8. Горчаков Г.И., Баженов Ю.М. Строительные материалы. – М.: Стройиздат, 1986. – 688 с. 9. Боровиков А.М., Уголев Б.Н. Справочник по древесине: Справочник / Под ред. Б.Н.Уголева. – М.: Лесная промышленность, 1989. – 296 с. 10. Плугин Д.А. Механизм усушки и набухания древесины // Научно-технический сборник «Коммунальное хозяйство городов». – Харьков: ХГАГХ. – 2002. – Вып. 43. – С. 289-295. 11. Стрекаловский Н.И. О технических свойствах древесины сосны бассейна реки Ваги // Труды Архангельского лесотехнического института. – Архангельск: АЛТИ. – 1939. – Вып. XI. – С. 3-50. 12. Кухлинг Х. Справочник по физике: Пер. с нем. – М.: Мир, 1982. – 520 с. 13. Баранов М.И. Моделирование электромагнитного эффекта при прямом ударе молнии в металлическую обшивку летательного аппарата // Технічна електродинаміка. – 1999. – № 1. – С. 16-21. 14. Баранов М.И. Моделирование электромагнитного эффекта при прямом ударе молнии в металлическую обшивку летательного аппарата // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Електроенергетика та перетворююча техніка. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2002. – № 7, т. 1. – С. 58-70. 15. *Сопротивление материалов: Учебник для ВУЗов / Под общ. ред. П.С.Писаренко.* – Киев: Вища школа, 1979. – 696 с. 16. Смирнов А.Ф., Александров А.В., Монахов Н.И. и др. Сопротивление материалов. – М.: Высшая школа, 1968. – 595 с. 17. Баранов М.И., Лисенко В.О. Моделирование электродинамических процессов в відокремленому капілярі дерев'яної конструкції при дії на неї прямого удару блискавки // Інформаційні технології: Наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я. – Матеріали XVII Міжнародної науково-практичної конференції (Харків, 20-22 травня 2009 р.), Частина II. – Харків: НТУ «ХПІ». – С. 334. 18. Зисман Г.А., Тодес О.М. Курс общей физики. Ч. 1. – М.: Наука, 1965. – 350 с. 19. Баранов М.И. Приближенный расчет электрической эрозии металлических электродов высоковольтных силовых коммутаторов // Технічна електродинаміка. – 2004. – № 5. – С. 11-14.

Поступила в редколлегию 09.11.2009

М.И.БАРАНОВ, докт.техн.наук, главн.науч.сотр., НТУ «ХПИ»;
М.А.НОСЕНКО, науч.сотр., НТУ «ХПИ»

ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ТОКА ЛИНЕЙНОЙ МОЛНИИ НА МЕТАЛЛИЧЕСКУЮ ОБШИВКУ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Наведено різніну схему рішення задачі електротеплової дії імпульсної складової струму блискавки при прямому ударі її в металеву обшивку літального апарату. Представлено результати апробації розробленої чисельної моделі при дії зазначеної складової струму блискавки на алюмінієві зразки обшивки літального апарату.

Difference scheme for a solution of electrothermal problem influence of pulse component of lightning current at its direct stroke in metal covering of aircraft is given. The results of approbation of the developed numerical model at action of the specified component of lightning current on aluminium specimen of aircraft covering are presented.

1 ВВЕДЕНИЕ

Линейные молнии достаточно часто попадают в самолеты, летающие в земной воздушной атмосфере (для мирового авиапарка в среднем до трех раз в год) [1]. Одной из наиболее тяжелых авиационных аварий с катастрофическими последствиями, вызванной линейной молнией, является та, которая произошла 8 декабря 1963 года в районе г. Эклтон (штат Мэрилэнд, США) [1]. Тогда попавшая в самолет гражданской авиации молния проникла в его резервный бак горючего, что привело к его воспламенению и взрыву всего самолета. Поэтому вопросы термического воздействия тока молнии на обшивку летательного аппарата (ЛА) являются актуальными для разработчиков ЛА во многих странах мира. Теоретические исследования, посвященные приближенным оценкам теплового воздействия тока молнии на металлическую обшивку ЛА, содержат, как правило, одномерные модели температурного поля в зоне действия плазменного канала молнии [2-4]. В [5] было представлено численное решение двумерной электротепловой задачи для плоской металлической обшивки ЛА конечной толщины, подверженной воздействию длительной составляющей тока молнии. Определенный интерес представляет решение подобной задачи для импульсной составляющей тока молнии, характеризующейся амплитудой в сотни килоампер и полной длительностью в сотни микросекунд.

2 ПОСТАНОВКА ЭЛЕКТРОТЕПЛОВОЙ ЗАДАЧИ

При решении двумерной электротепловой задачи воздействия импульсной составляющей тока молнии $i_m(t)$ на размещенный в атмосферном воздухе с температурой $\theta_0 = 0$ °С плоский образец тонкостенной металлической обшивки

ЛА используем цилиндрическую систему координат (рис. 1).

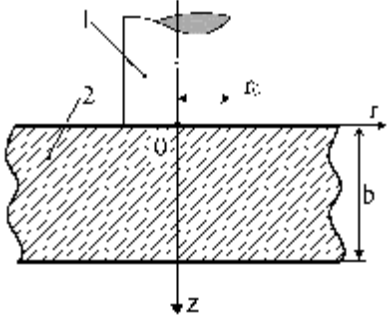


Рисунок 1 – Расчетная схема воздействия канала тока молнии на листовой образец металлической обшивки ЛА (1 – канал молнии; 2 – образец)

В соответствии с теорией нестационарной теплопроводности уравнение, описывающее от действия канала молнии неустановившееся температурное поле в плоском образце металлической обшивки ЛА, имеет вид [6,7]:

$$c_0 \frac{\partial \theta}{\partial t} = \lambda_0 \nabla^2 \theta + \frac{\delta^2 (1 + c_0 \beta_0 \theta)}{\gamma_0}, \quad (1)$$

где $\theta = (\theta_t - \theta_0)$ – приращение температуры материала образца обшивки, °C; θ_t – текущая во времени t температура материала образца обшивки, °C; ∇^2 – оператор Лапласа; λ_0 – коэффициент теплопроводности материала образца обшивки, Дж/м·с·°C; c_0 – удельная

объемная теплоемкость материала образца обшивки, Дж/м³·°C; β_0 – температурный коэффициент удельной электропроводности материала образца обшивки, м³/Дж; γ_0 – удельная электропроводность материала образца обшивки при $\theta_0 = 0$ °C, (Ом·м)⁻¹; $\delta = \frac{i_m(t)}{\pi r_0^2(t)}$ – максимальная плотность тока молнии в материале образца обшивки, А/м²; $r_0(t)$ – радиус плазменного канала молнии цилиндрической конфигурации, м.

Для импульсной составляющей тока молнии $i_m(t)$, характеризующейся временной формой 2/50 мкс, амплитудой I_m и значением полной длительности ее протекания по образцу обшивки ЛА $t_0 = 500$ мкс, запишем [8]:

$$i_m(t) = \beta_m I_m \cdot [\exp(-\alpha_1 t) - \exp(-\alpha_2 t)], \quad (2)$$

где $I_m = 200$ кА – нормированная требованиями межгосударственного ГОСТ 30585-98 [9] амплитуда импульсной составляющей тока молнии; $\alpha_1 \approx 0,76/\tau_u = 1,529 \cdot 10^4$ с⁻¹; $\alpha_2 \approx 2,37/\tau_\phi = 1,188 \cdot 10^6$ с⁻¹; $\tau_\phi = 2 \cdot 10^{-6}$ с – длительность фронта импульсной составляющей тока молнии между уровнями 0,1-0,9 от его амплитуды I_m ; $\tau_u = 50 \cdot 10^{-6}$ с – длительность импульсной составляющей тока молнии на уровне 0,5 от ее токовой амплитуды I_m ; $\beta_m = \left[(\alpha_1 / \alpha_2)^{\alpha_1 / (\alpha_2 - \alpha_1)} - (\alpha_1 / \alpha_2)^{\alpha_2 / (\alpha_2 - \alpha_1)} \right]^{-1} = 1,072$ – нормирующий коэффициент.

При решении данной нестационарной электротепловой задачи неравномерностью распределения плотности тока молнии $i_m(t)$ по поперечному сечению канала грозового разряда и соответственно радиальной неравномерностью плотности теплового потока в круговой опорной зоне искрового канала молнии

радиусом r_0 , поступающего для временного интервала $0 \leq t \leq t_0$ в металлическую обшивку ЛА, пренебрегаем. При указанных допущениях на стадии протекания импульсной составляющей тока молнии $i_m(t)$ для текущего значения радиуса $r_0(t)$ его плазменного канала воспользуемся известной формулой Благинского применительно к максимальному радиусу сильноточного канала искрового разряда в атмосферном воздухе [10]. Тогда выражение для текущего радиуса канала молнии представим в следующем аналитическом виде:

$$r_0(t) = r_{0m} \cdot \beta_m^{1/2} \cdot [\exp(-\alpha_1 t) - \exp(-\alpha_2 t)]^{1/2}, \quad (3)$$

где $r_{0m} = 0,093 (I_m)^{1/3} \cdot (t_m)^{1/2}$ – максимальное значение радиуса канала молнии; $t_m = \ln(\alpha_2 / \alpha_1) / (\alpha_2 - \alpha_1)$ – время, соответствующее амплитуде I_m тока молнии (при указанных выше коэффициентах ее формы α_1 и α_2 величина t_m численно составляет значение, равное примерно 3,71 мкс).

С учетом вышеизложенного, уравнение (1) примет следующий вид:

$$c_0 \frac{\partial \theta}{\partial t} = \lambda_0 \left[\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right] + \frac{I_m^2 \cdot (1 + c_0 \beta_0 \theta)}{\pi^2 r_{0m}^4 \gamma_0}. \quad (4)$$

Дополним уравнение (4) начальными и граничными условиями.

Начальное условие:

$$\theta(r, z, 0) = 0. \quad (5)$$

Граничные условия:

Для $r = 0$ и $0 \leq z < b$

$$\frac{\partial \theta}{\partial r} = 0. \quad (6)$$

Для $z = 0$

при $0 \leq r \leq r_{0m}$

$$-\frac{\partial \theta}{\partial z} = 10 \frac{I_m}{\pi \lambda_0 r_{0m}^2}; \quad (7)$$

при $r > r_{0m}$

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} - \frac{Bi_0 \cdot \theta}{r_{0m}} = 0, \quad (8)$$

где $Bi_0 = \frac{\alpha_0 \cdot r_{0m}}{\lambda_0}$; Bi_0 – коэффициент Био при $z = 0$; α_0 – коэффициент

теплоотдачи с наружной поверхности ($z = 0$) образца ($\alpha_0 = 5,6$ Вт/м²·°C [7]).

Для $z = b$ и $r > 0$

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} + \frac{Bi_b \cdot \theta}{r_{0m}} = 0, \quad (9)$$

где $Bi_b = \frac{\alpha_b \cdot r_{0m}}{\lambda_0}$, Bi_b – коэффициент Био при $z = b$, α_b – коэффициент

теплоотдачи с внутренней поверхности ($z = b$) образца ($\alpha_b = 5,6$ Вт/м²·°C [7]).

Для удаленных расчетных областей образца $r \geq 3r_{0m}$. Считаем, что при $r = 3r_{0m}$ значения превышения температуры материала образца равны нулю:

$$\theta(3r_{0m}, z, t) = 0. \quad (10)$$

Таким образом, уравнение (4) с начальным (5) и граничными (6)–(10) условиями представляют в приближенном виде полную формулировку электротепловой задачи воздействия импульсной составляющей тока молнии на металлическую обшивку ЛА.

3 РАЗНОСТНАЯ СХЕМА ЭЛЕКТРОТЕПЛОВОЙ ЗАДАЧИ

Уравнение (4) для исследуемого плоского образца металлической обшивки ЛА при прямом ударе в нее молнии в безразмерном виде примет вид:

$$\frac{\partial \theta^*}{\partial t^*} = \left[\frac{1}{r^*} \cdot \frac{\partial \theta^*}{\partial r^*} + \frac{\partial^2 \theta^*}{\partial (r^*)^2} + \frac{\partial^2 \theta^*}{\partial (z^*)^2} \right] + \frac{I_m^2 \cdot c_0 \cdot \beta_0 \cdot (1 + \theta^*)}{\pi^2 \cdot r_{0m}^2 \cdot \gamma_0 \cdot \lambda_0}, \quad (11)$$

где $\theta^* = \theta/\theta_b$; $\theta_b = \frac{1}{c_0 \cdot \beta_0}$ – базисная температура; $r^* = \frac{r}{r_{0m}}$; $z^* = \frac{z}{r_{0m}}$;

$t^* = \frac{t}{t_b}$; $t_b = \frac{c_0 \cdot r_{0m}^2}{\lambda_0}$ – базисное время; r, z – радиальная и продольная координаты в материале плоской стенки обшивки ЛА.

Необходимые начальные и граничные условия для уравнения (11) в безразмерном виде будут иметь следующий вид:

Начальное условие:

$$\theta^*(r^*, z^*, 0) = 0. \quad (12)$$

Граничные условия:

Для $r^* = 0$ и $0 \leq z^* < b/r_{0m}$

$$\frac{\partial \theta^*}{\partial r^*} = 0. \quad (13)$$

Для $z^* = 0$ при $0 \leq r^* \leq 1$

$$-\frac{\partial \theta^*}{\partial z^*} = 10 \frac{I_m \cdot c_0 \cdot \beta_0}{\pi \cdot \lambda_0 \cdot r_{0m}}; \quad (14)$$

при $r^* > 1$

$$\frac{\partial \theta^*}{\partial z^*} - Bi_0 \cdot \theta^* = 0. \quad (15)$$

Для $z^* = b/r_{0m}$ и $r^* \geq 0$

$$\frac{\partial \theta^*}{\partial z^*} + Bi_b \cdot \theta^* = 0. \quad (16)$$

Для удаленных расчетных областей образца при $r^* = 3$ имеем:

$$\theta^*(3, z^*, t^*) = 0. \quad (17)$$

Для уравнения (11) с начальным (12) и граничными (13)–(17) условиями была построена разностная схема, обеспечивающая второй порядок аппроксимации по пространственному шагу h и временному шагу τ_c сетки [5]. Ширина

A прямоугольной расчетной области разбивается на N интервалов, причем каждый размером $h = A/N$. Высота B прямоугольной расчетной области разбивается на M частей, исходя из равенства $h = B/M$.

В разностном виде система линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) для решаемой двумерной электротепловой задачи будет иметь такой вид:

$$C_0 \theta_{i,j}^k + C_1 \theta_{i,j-1}^k + C_2 \theta_{i,j+1}^k + C_3 \theta_{i-1,j}^k + C_4 \theta_{i+1,j}^k = F_{i,j}^k, \quad (18)$$

$$\text{где } C_0 = \frac{2h^2}{\tau_c} + 4 - \frac{I_m^2 c_0 \beta_0}{\pi^2 r_{0m}^2 \gamma_0 \lambda_0} \cdot h^2; \quad C_1 = -1; \quad C_2 = -1; \quad C_3 = \frac{1}{2i} - 1;$$

$$C_4 = -\frac{1}{2i} - 1; \quad F_{i,j}^k = \theta_{i,j}^{k-1} \left(\frac{2h^2}{\tau_c} - 4 + h^2 \cdot \frac{I_m^2 c_0 \beta_0}{\pi^2 r_{0m}^2 \gamma_0 \lambda_0} \right) + \theta_{i,j-1}^{k-1} + \theta_{i,j+1}^{k-1} + \theta_{i-1,j}^{k-1} \left(1 - \frac{1}{2i} \right) + \theta_{i+1,j}^{k-1} \left(1 + \frac{1}{2i} \right) + \frac{2I_m^2 c_0 \beta_0}{\pi^2 r_{0m}^2 \gamma_0 \lambda_0} \cdot h^2.$$

Начальное условие для решения уравнения (18) в разностной аппроксимации примет такой вид:

$$q_{i,j}^0 = 0 \quad \{i = 0 \dots N, j = 0 \dots M\}. \quad (19)$$

Граничные условия в разностной форме будут иметь нижеследующий вид:

– На границе $i = 0$ (при $r^* = 0$) действует граничное условие (13), которое представляется односторонней разностной аппроксимацией внутрь расчетной области и в разностном виде после приведения будет иметь вид:

$$-3 \cdot \theta_{0,j}^k + 4 \cdot \theta_{1,j}^k - \theta_{2,j}^k = 0, \quad \text{для } \{j = 0 \dots M-1\}. \quad (20)$$

– На границе $j = 0$ (при $z^* = 0$) имеем граничные условия для $0 \leq r^* \leq 1$ вида (14) и для $r^* > 1$ – вида (15). Для производной на границе $j = 0$ (при $z^* = 0$) была построена односторонняя внутрь расчетной области разностная аппроксимация второго порядка. Недостающие в рассматриваемой схеме задачи уравнения в разностном виде будут иметь вид:

– для области $0 \leq i \leq K$:

$$\theta_{i,0}^k = \frac{1}{3} \left(4 \cdot \theta_{i,1}^k - \theta_{i,2}^k + 20 \cdot \frac{I_m c_0 \beta_0}{\pi \lambda_0 r_{0m}} \cdot h \right); \quad (21)$$

– для области $K \leq i \leq N-1$:

$$\theta_{i,0}^k = \frac{4 \cdot \theta_{i,1}^k - \theta_{i,2}^k}{2Bi_0 \cdot h + 3}. \quad (22)$$

– На границе $j = M$ (при $z^* = b/r_{0m}$) имеем граничное условие вида (16), которое записывается односторонней разностной аппроксимацией внутрь расчетной области, имеющее следующий вид:

$$\theta_{i,M}^k = \frac{4 \cdot \theta_{i,M-1}^k - \theta_{i,M-2}^k}{2h \cdot Bi_b + 3}. \quad (23)$$

- На границе расчетной области $i = N$ (при $r^* = 0$) имеем граничное условие $\theta_{N,j}^k = 0$, характерное для бесконечно удаленной границы данной области. С учетом этого условия на линии $i = N - 1$ получаем:

$$\theta_{N-1,j}^k = \frac{F_{N-1,j}^k - C_1 \theta_{N-1,j-1}^k - C_2 \theta_{N-1,j+1}^k + C_3 \theta_{N-2,j}^k}{C_0}. \quad (24)$$

Уравнения (18)–(24) представляют собой СЛАУ порядка $(N - 1) \cdot (M - 1)$ для решаемой электротепловой задачи. Решив данную СЛАУ относительно величины $\theta_{i,j}^k$ ($\theta_{i,j}^k = \theta(k\tau, ir, jz)$ – сеточная функция), получим распределение искомой сеточной функции $\theta_{i,j}$ на временном слое $k = t/\tau_c$, где t – текущее значение времени. Порядок данной СЛАУ достигает нескольких тысяч, но при этом большинство ее элементов имеет нулевое значение, то есть матрица полученной СЛАУ будет сильно разрежена. Решение системы полученных разностных уравнений было выполнено с использованием метода Гаусса-Зейделя [11].

4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ СЛАУ ЗАДАЧИ

Численный расчет сформулированной в разностном виде задачи был произведен в соответствии с алгоритмом, разработанным ранее нами в [5] с использованием указанного выше метода для исследуемой импульсной составляющей тока молнии ($I_m = 200$ кА, $t_0 = 500$ мкс) применительно к алюминиевым образцам обшивки ЛА разной толщины. Это дало возможность использовать следующие исходные параметры для разностного уравнения (18): $c_0 = 2,7 \cdot 10^6$ Дж/м³·°C; $\beta_0 = 2,14 \cdot 10^{-9}$ м³/Дж; $\gamma_0 = 3,61 \cdot 10^7$ (Ом·м)⁻¹; $\lambda_0 = 240$ Дж/м·с·°C. В этом случае максимальный радиус искрового канала примет значение $r_{0m} = 10,48$ мм. При расчете были приняты следующие диапазоны изменения параметров: $r^* = 0 - 3$; $t^* = 0 - t_0^*$. Безразмерное время счета t_0^* рассчитывалось из того условия, что полная длительность импульса тока 2/50 мкс равна 500 мкс ($t_b = 1,2356$ с). Тогда имеем, что $t_0^* = 500 \cdot 10^{-6} / 1,2356 = 4,05 \cdot 10^{-4}$. В расчете толщина b образца обшивки ЛА варьировалась от 1 до 10 мм. Временной шаг τ_c принимали равным $4 \cdot 10^{-8}$. При этом количество шагов T по времени в разностной схеме составит величину, численно равную $t_0^* / \tau_c = 10^4$. Для листовых образцов обшивки ЛА различной толщины b были получены изменения температуры θ_t в зоне воздействия на них импульсной компоненты тока молнии с принятыми амплитудно-временными параметрами. Расчетные данные для θ_t позволили определить диаметр $2r_{\Pi}$ и глубину b_{Π} проплавляемой лунки в исследуемом образце, исходя из условия $\theta_t \geq \theta_{\Pi}$, где θ_{Π} – температура плавления материала образца обшивки ЛА. Для исследуемых образцов было принято, что $\theta_{\Pi} = 658$ °C [12]. На основании проведенных расчетов было установлено, что при одних и тех же параметрах воздействующего импульса тока молнии полученный радиус r_{Π} лунки проплавления и ее глубина b_{Π} , а также температура θ_t в центре зоны проплавления исследуемого образца не зависят от его толщины b . Расчетные размеры и фор-

ма получаемой лунки проплавления для исследуемых алюминиевых образцов обшивки ЛА с толщиной $b \geq 1$ мм представлены на рис. 2, на котором все размеры численно даны в мм.

Проведенные исследования показали, что максимальная расчетная температура на наружной поверхности алюминиевого образца обшивки ЛА в эпицентре воздействия на него канала молнии с импульсной составляющей тока 2/50 мкс составляет около $\theta_t = 5775$ °C. Отметим, что для аналогичной задачи, ранее решенной авторами аналитическим путем [13], данная температура составила $\theta_t = 6003$ °C. Кроме того, полученные здесь расчетные результаты для θ_t , r_{Π} и b_{Π} хорошо согласуются с имеющимися экспериментальными данными по воздействию на листовый металл обшивки импульсной составляющей тока молнии (проплавление алюминиевой обшивки ЛА составляет не более 0,4 мм, лунка имеет тарельчатую форму, а ее радиус близок к значению r_{0m}) [13].

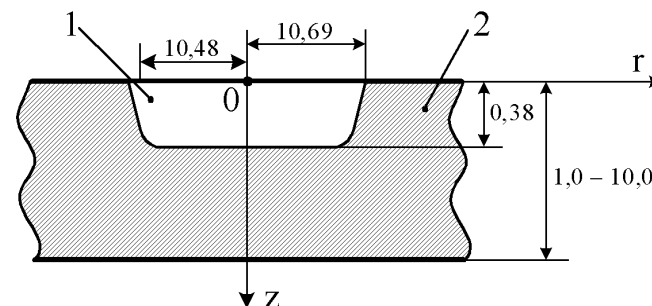


Рисунок 2 – Форма и размеры лунки проплавления в листовом образце алюминиевой обшивки ЛА при воздействии на него импульсной компоненты тока молнии 2/50 мкс (1 – лунка; 2 – образец; толщина стенки образца 1–10 мм; амплитуда тока – 200 кА)

5 ВЫВОДЫ

1. Сформулирована и численно решена разностным методом двумерная нестационарная электротепловая задача воздействия импульсной составляющей тока молнии временной формы 2/50 мкс на металлическую обшивку ЛА.
2. Проведена апробация полученной разностной схемы задачи для плоских алюминиевых образцов обшивки ЛА толщиной от 1 до 10 мм при воздействии на них импульсной составляющей тока молнии 2/50 мкс с амплитудой 200 кА и полной длительностью 500 мкс. Показана независимость радиуса r_{Π} и глубины b_{Π} лунки проплавления в указанных образцах, а также максимальной температуры на наружной поверхности исследуемых образцов от их толщины.

Список литературы: 1. Коваленко Е.И. Что мы знаем о молнии? // <http://anomalial.kulichki.ru/text7/249.htm>. 2. Абрамов Н.Р., Кузескин И.П., Ларионов В.П. Характеристики проплавления стенок металлических объектов при воздействии на них молнии // Электричество. – 1986. – № 11. – С. 22-27. 3. Абрамов Н.Р., Кузескин И.П. К расчету нагрева стенок металлических объектов при воздействии на них молнии // Электричество. – 1990. – № 5. – С. 56-59. 4. Бара-

нов *М.И.* Одномерная электротепловая задача для металлической обшивки летательного аппарата при воздействии на нее молнии // *Электротехника и электромеханика*. – 2007. – № 1. – С. 65–71. 5. *Баранов М.И., Носенко М.А.* Разностная схема двумерной электротепловой задачи для металлической обшивки летательного аппарата при прямом ударе в нее линейной молнии // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка та електрофізика високих напруг. – Харків: НТУ «ХПІ», – 2008. – № 44. – С. 9-18. 6. *Лыков А.В.* Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 599 с. 7. *Карслоу Г., Егер Д.* Теплопроводность твердых тел. – М.: Наука, 1964. – 487 с. 8. *Баранов М.И.* Моделирование электромагнитного эффекта при прямом ударе молнии в металлическую обшивку летательного аппарата // *Технічна електродинаміка*. – 1999. – № 1. – С. 16-21. 9. Межгосударственный ГОСТ 30585-98. Стойкость к воздействию грозных разрядов. Технические требования и методы испытаний / Рук. разработки *В.И. Кравченко*. – Киев: Госстандарт Украины, 1998. – 27 с. 10. *Лозанский Э.Д., Фирсов О.Б.* Теория искры. – М.: Атомиздат, 1975. – 272 с. 11. *Мак-Кракен Д., Дорн У.* Численные методы и программирование на Фортране. – М.: Мир, 1977. – 584 с. 12. *Енохович А.С.* Справочник по физике и технике. – М.: Просвещение, 1983. – 255 с. 13. *Баранов М.И., Носенко М.А.* Исследование термического действия тока искусственной молнии на образцы металлической обшивки летательного аппарата авиационной техники // *Инженерно-физический журнал*. – 2009. – Том 82. – № 5. – С. 972–980.

Поступила в редколлегию 17.11.2009

УДК 004.65

В.С.БРЕСЛАВЕЦЬ, канд.техн.наук, доцент, НТУ «ХПІ»;
В.М.ПОШТАРЕНКО, канд.техн.наук, доцент, НТУ «ХПІ»;
О.М.СЕМЕНОВА, студент, НТУ «ХПІ»

ОЦІНКА ЯКОСТІ НАВЧАННЯ СТУДЕНТІВ

Розглянуто основні принципи оцінки якості успішності студентів. Показано можливість і описана методика оцінки в будь-якій області, що дозволяє зробити більш якісну оцінку.

Basic principles of estimation of quality of progress of students are considered. Possibility is shown and the method of estimation is described in any area, that allows to do more high-quality estimation.

Постановка проблеми. Оцінка якості навчання є одним з основних чинників підвищення ефективності освітнього процесу у вищій школі в цілому. В умовах забезпечення індивідуального підходу до кожного навчального процесу дуже важливо коректно провести якісний і кількісний аналіз їх знань і умінь. Такий аналіз є складною залежністю з великим числом змінних. Проведення подібного аналізу часто вимагає великих витрат сил і часу на проведення статистичних розрахунків. Оцінювання якості навчання з використанням комп'ютерних технологій дозволяє значно скоротити час і трудовитрати аналізу і підвищує інформативність результатів.

Досягнення якості навчання забезпечується рядом чинників, до яких можна віднести наступні:

- кадрове забезпечення навчального процесу;
- матеріально-технічна база, бібліотечне і інформаційне забезпечення навчального процесу;
- методичне забезпечення навчального процесу;
- дидактичне забезпечення;
- організаційне забезпечення навчального процесу.

Наявність відповідного рівня даних чинників, є необхідною умовою для досягнення високої якості навчання по навчальних дисциплінах або циклах навчальних дисциплін освітніх програм вищої професійної освіти. Кінцевий результат навчання залежить не тільки від умов навчання, але і від індивідуальних здібностей студентів, їх мотивації в процесі навчання, здібностей викладачів реалізувати поставлені цілі навчання за допомогою сучасних методів і технологій навчання.

Педагогічну взаємодію суб'єктів освітнього процесу у вузі, студентів і викладачів, не піддається повній формалізації, що ускладнює отримання однозначних висновків про якість навчання. При аналізі були встановлені критерії оцінки якості знань, а також чинники, що впливають на отримання знань. Проте, одна з невирішених проблем, з якими в даний час в тій чи іншій мірі стикаються всі вузи, є перевірка залишкових знань студентів. Процедура і умови її проведення, як правило, недостатньо продумані, а у ряді випадків до неї відносяться як до формального чергового заходу. Головними і типовими недоліками перевірки є підміна залишкових знань як її об'єкт знаннями «поточними» і списування студентами відповідей на поставлені питання.

В даний час існує ряд комп'ютерних систем для контролю знань студентів. Основним недоліком існуючих програмних продуктів є відсутність блоку аналізу результатів тестування (або існування його в автономному вигляді).

Аналіз літератури. На сьогоднішній день існує ряд публікацій в яких описуються методичні рекомендації по аналізу якості навчання студентів по дисциплінах [1, 2, 3, 4, 8]. Існує багато продуктів програмного забезпечення, за допомогою яких здійснюється контроль знань. Використовується безліч систем тестування якості знань [7]. Проте у всіх цих розробках є як плюси, так і мінуси. Для отримання даних про якість знань, дані методики використовують величезні ресурси наукових закладів. Це обробка даних, створення програмного забезпечення за допомогою якого експерти зможуть обробляти дані.

Деякі методи використовують ручний збір аналізу, ручну обробку аналізу. Пропонуються вже комп'ютеризовані системи збору і аналізу. Оцінка і аналіз в даній статті, пропонується, з використанням середовища Oracle, в якому вже існують функції для аналізу. Що також дає можливість не створювати програми, які аналізуватимуть, а використовувати що вже існують.

Метою статті є аналіз оцінки якості навчання студентів. Визначення і виділення основних критеріїв.

Організація якості навчання студентів пов'язана з різними суперечностями:

1. Відсутність тезауруса.

Освіта конкретної людини. Саме воно є суспільним і індивідуальною цінністю, соціальним і особистим завданнями, для вирішення яких створена система освіти.

2. Стабільність і мінливість освіти.

Якість освіти фахівця здійснюється в процесі оволодіння ним змістом матеріальної і духовної культури, що історично склався.

3. Виділення якості професійної освіти.

Людина може успішно виконувати професійну діяльність, якщо він володіє способами її здійснення, представляє можливі варіанти наслідків, має здібності до її реалізації – що свідчить про якість професійного утворення.

4. Теоретичне і практичне навчання.

5. Стандарти оцінки викладача і кваліфікаційні вимоги до фахівцеві.

Педагогічна і наукова діяльність викладачів вузу слабо пов'язана з майбутньою професійною діяльністю випускників.

6. Навчання професійним дисциплінам і практика вирішення стандартних професійних завдань.

7. Спостереження дозволяє виділити два основні підходи до оцінки якості освіти.

Перший підхід – гуманістичний – орієнтований на забезпечення потреби якості його освіти, що навчається в об'єктивній оцінці. Другий підхід – технологічний – направлений на технологію оцінювання.

8. Володіння випусником фундаментальними знаннями і слабка готовність виконувати професійні обов'язки.

Вирішення цих протиріч доцільно почати з:

- розробки моделі результату вузівської підготовки фахівця;
- проектування системи оцінки якості освіти;
- створення понятійно-категоріального апарату проблеми «оцінка якості утворення»;
- розробки методичного забезпечення різного виду практик;
- видання допомоги для самостійної роботи студентів по оволодінню окремими дисциплінами і професією в цілому;
- описи стандартних професійних завдань по кожній спеціальності і універсальних принципів, методів і підходів до їх рішення.

Забезпечує постійний контроль якості навчання і управління ним з боку адміністрації університету, керівництво факультетів і учбових інститутів, завдувачок кафедр і викладачів, а також до певної міри з боку учнів в цілях:

- а) вдосконалення змісту освіти
- б) поліпшення організації навчання
- в) підвищення ефективності всіх процесів передачі і сприйняття знань.

За допомогою оцінки якості навчання буде досягнуто:

1. забезпечення високого рівня якості освіти;
2. забезпечення якості освіти здійснюється на науковій, системній основі з урахуванням інноваційних процесів, що відбуваються в міжнародній системі вищої освіти;
3. система якості освіти строго формалізована і може бути документально і практично відстежена у всіх основних процесах організації і реалізації навчання;
4. якість навчання відстежується, забезпечується і удосконалюється за кожною освітньою програмою, по кожному факультету (учбовому інституту);
5. поліпшення якості навчання здійснюється на основі розробки стратегічних і оперативних планів;
6. провідна роль в забезпеченні якості навчання належить керівникам університету: ректорові, проректорам і деканам факультетів (директорам учбових інститутів);
7. до реалізації процесів забезпечення якості освіти залучені всі учасники організації і реалізації учбового процесу;
8. незалежний контроль забезпечення якості освіти здійснюють студентські організації;
9. якість освіти поліпшується в безперервному циклічному режимі і періодично відстежується по встановлених критеріях і результатах соціологічних досліджень.

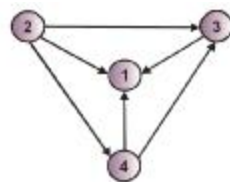


Рисунок 1 – Логічна структура процесу навчання

Важливим аспектом, що характеризує процес навчання, є той, що реалізовує його алгоритм, що складається з декількох обов'язкових етапів, кожен з яких має свою мету. Метою першого етапу є подання нової інформації. На другому етапі вона засвоюється перетворюючись на знання. Відповідно до принципів зворотнього зв'язку на третьому етапі необхідний контроль якості знання. Після цього настає етап оцінки проконтрольованих знань. Завершує цю процедуру етап корекції [9]. У даному аналізі представлені базові функції системи, які розділені на два логічні блоки:

1. Блок комп'ютерного тестування.
2. Універсальний блок аналізу результатів експертного оцінювання.

Блок комп'ютерного тестування призначений для обробки даних педагогічного і психологічного тестування і є базовим в системі підтримки ухвалення рішення за наслідками комп'ютерного тестування.

Головна сторінка системи – це перше вікно, що бачить користувач. Після цього користувач мусить пройти авторизацію.

За допомогою цих панелей користувачу буде більш зручно обрати необхідний розділ для вводу інформації та перегляду даних.

Рисунок 2 – Сторінка авторизації

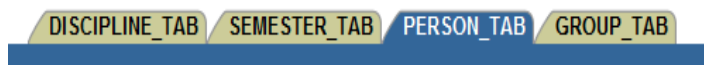


Рисунок 3 – Панелі навігації

Address	First Name	Last Name	Date Birth	Sex	Stature	Weight	Eye Color	Hair Color	Complexion	Birth Date	Birth Time	Birth Place
100000	John	Doe	10.10.84	M	180	75	Blue	Brown	Fair	10.10.84	10.10.84	USA
100000	Jane	Doe	10.10.84	F	165	60	Blue	Brown	Fair	10.10.84	10.10.84	USA
100000	John	Doe	10.10.84	M	180	75	Blue	Brown	Fair	10.10.84	10.10.84	USA

Рисунок 4 – Перша сторінка системи

Режим перегляду інформації. На першій сторінці присутня вся інформація про студентів.

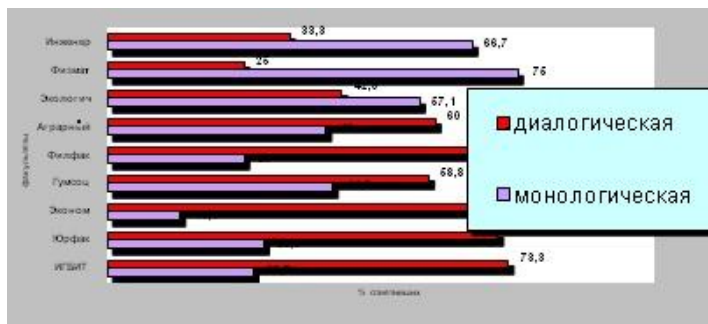


Рисунок 5 – Робота викладачів на заняттях

Був проведений аналіз за якістю викладання. Встановлювалося у процентному співвідношенні яка форма викладання засвоюється краще. А також про-

ведений аналіз за якістю знань отриманих під час цих занять.

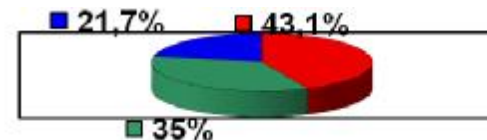


Рисунок 6 – Аналіз якості навчання студентів: червоний колір – відмінні і гарні оцінки; зелений колір – задовільно; синій колір – незадовільно

Згідно виявленому рівню знань формується оптимальна методика навчання, підбираються види її реалізації. Це можливо зробити з урахуванням інформації, наведеної у таблицях, які характеризують необхідність початкових параметрів, що оцінюють діапазон зміни даних, залежний від різних рівнів зворотного зв'язку. Подібний підхід дозволяє підвищити ефективність процесу навчання за рахунок використання відповідних видів подання інформації, типів контролю якості знань і корекції. Аналізуючи дані, отримані з використанням запропонованої моделі, здійснюємо коректування методики навчання, яка приведе до оптимізації результату.



Рисунок 7 – Логічна структура моделі учбового процесу

Інформаційна система бази даних являє собою систему описану вище, у неї входять база даних та програмні форми інформаційної системи.

Висновки: У роботі обґрунтовані критерії оцінки якості навчання студентів, проаналізовані можливості критеріїв оцінки, а також запропонований метод аналізу оволодіння навчального матеріалу на підставі аналізу результатів проміжного і підсумкового контролю, тестування. З використанням середовища Oracle з'являється можливість робити більш точний аналіз, завдяки вже іс-

нуючим функціям для аналізу. Побудова системи оцінки якості навчання студентів на основі Data mining Oracle дозволяє адаптуватися до різних вхідних даних, критеріїв оцінки.

Список літератури: 1. Берестнева О.Г., Марухина О.В. Методы многомерного анализа данных в задачах оценки качества образования // Радиоэлектроника. Информатика. Управление. – 2002. – № 1. – С. 15-26. 2. Минин М.Г. Диагностика качества знаний и компьютерные технологии обучения. – Томск: Изд-во ТГПУ, 2000. – 216 с. 3. Марухина О.В., Берестнева О.Г. Системный подход к оценке качества образования // Стандарты и качество. – 2002. – № 4. 4. Вроейнстийн А.И. Оценка качества высшего образования. – М., 2000. 5. Найини Л.А., Горбунова В.С., Тишина Е.М., Филиппова Н.А. Многомерная конструкция – математическая модель учебного процесса // Профессиональная подготовка учителя: История, теория, практика: Труды Всерос. науч-практ. конф. – Пенза: ПГПУ, 2006. – С. 293–298. 6. Марухина О.В. Алгоритмы обработки информации в задачах оценивания качества обучения студентов вуза на основе экспертно-статистических методов: Дис. канд. техн. наук: 05.13.01. – Томск, 2003. – 165 с. 7. Берестнева О.Г., Марухина О.В. Компьютерные технологии в оценке качества обучения. – 111 с. 8. Вроейнстийн А.И. Оценка качества высшего образования. – М., 2000. 9. Подласый И.П. Педагогика: Учебник для вуза. – М.: Гуманит. изд. центр «ВЛАДОС», 2001. Кн. 1. – 576 с. 10. Методика оцінювання – <http://tqm.stankin.ru/arch/n02/articles/10.htm>.

Надійшла до редколегії 30.10.2009

УДК 621.746.044.4.001.57

И.В.БУРАВИЛОВ, ННЦ ХФТИ НАНУ;
Д.В.ВИННИКОВ, ННЦ ХФТИ НАНУ;
В.Б.ЮФЕРОВ, докт.техн.наук, ННЦ ХФТИ НАНУ;
Б.В.БОРЦ, канд.техн.наук, ННЦ ХФТИ НАНУ;
А.Ф.ВАНЖА, канд.техн.наук, ННЦ ХФТИ НАНУ;
А.Н.ПОНОМАРЕВ, ННЦ ХФТИ НАНУ;
А.Н.ОЗЕРОВ, ННЦ ХФТИ НАНУ;
Е.В.МУФЕЛЬ, ННЦ ХФТИ НАНУ;
Г.В. ПИСАРЕВ, ННЦ ХФТИ НАНУ

УМЕНЬШЕНИЕ РАЗМЕРОВ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ЗЕРНА СЛИТКОВ В ВАКУУМНО-ДУГОВЫХ ПЕЧАХ С ИМПУЛЬСНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

Створена установка вакуумно-дугової плавки з акустичним впливом на розплав. Проведені акустичні виміри під час роботи допоміжного обладнання, та пневмовібратора. Оцінені основні параметри системи, та запропонована модель поведінки рідкої фази під час впливу. Розмір кристалічного зерна, отриманий під час акустичного впливу зменшився в 2-3 рази.

The vacuum-arc melting plant with acoustic influence on melted metal has been created. The acoustic measurements during additional equipment and pneumovibrator operation has been done. The basic system parameters have been evaluated. The model of liquid phase behavior during action is proposed. The crystalline grain dimension obtained during acoustic influence was reduced by 2 to 3 times.

Достижения современного материаловедения во многом обусловлены углубленным изучением процессов кристаллизации. Накопленные знания свидетельствуют, что для обеспечения наилучших механических свойств металла в

изделиях необходимо создавать заданную макро- и микроструктуру с контролируемым химическим составом. При этом в большинстве случаев важно получить химическую и структурную однородность. Есть ряд способов управления процессом кристаллизации металлов и сплавов, позволяющих получить заданную однородную структуру. Однако, способы, применяющиеся для увеличения однородности металлов и снижения размера кристаллического зерна, связанные с введением искусственных центров кристаллизации не пригодны для чистых металлов ядерной энергетики. Здесь, по-видимому, применимы способы интенсификации процессов кристаллизации на основе электрогидроимпульсной технологии [1, 2, 4], заключающиеся в генерировании и последующем вводе в кристаллизующийся из расплава материал мощных поличастотных импульсов упругих колебаний на всех стадиях затвердевания – от предкристаллизации до полного перехода в твердую фазу.

В процессе вакуумно-дуговой плавки металлов, метода, широко используемого при производстве металлов для атомной промышленности, в слитках образуются крупнозернистые дендритные структуры с размером зерна около 3-5 мм в радиальном и 10-30 мм и более в осевом направлении. Эти структурные особенности возникают, как при фазовом переходе, жидкость-твердое тело, так и при α - β переходах в твердом теле. Процесс кристаллизации металла является, во многом определяющим качество готового изделия. Многие особенности строения слитка, формирующиеся при его затвердевании, после всех этапов передела переходят в полуфабрикаты и готовые изделия. Для улучшения структурозависимых свойств, в частности прочности, целесообразно уменьшение размеров кристаллического зерна. Поэтому исследование возможности влияния на структуру слитков является важным и актуальным. Высокоэффективный способ интенсификации процессов кристаллизации путем введения в кристаллизатор мощных акустических импульсов является крайне необходимым при производстве материалов для атомной промышленности [3].

Мощные упругие колебания и низкочастотная общая вибрация, генерируемые электровзрывом, благоприятно изменяют потоки так, что они эффективно разрушают ликвационный слой и систему направленного осаждения кристаллов. Этот механизм способствует и более равномерному распределению примесей.

В процессе создания ВДП с акустическим воздействием были рассмотрены гипотетические параметры акустических генераторов. Энергия воздействия $Q = f q$, является произведением частоты импульсов f на их удельную энергию q . Поэтому были рассмотрены два режима: с высокой частотой и умеренным энерговыделением (f около 100-400 Гц и q до 10 Дж) и второй – с умеренной частотой и большим высоким энерговыделением: (f – 10 Гц и q около 40-400 Дж).

Для понимания картины воздействия акустических импульсов на слиток, на первом этапе были проведены эксперименты по регистрации сигналов от всего оборудования, которое входит в состав ВДП; до, в процессе, и после плавки. Экспериментальная установка включала: ВДП, системы вакуумной от-

качки, электро и водо- снабжения, излучатель пневмомеханического типа (ПМИ). ПМИ включает: электродвигатель, 1,2 кВт, 2500 об/мин, исполнительный механизм - вакуумный сильфон с токопроводом, который крепится на дно тигля и устройство, преобразующее вращение мотора в колебательное движение исполнительного механизма. Присутствие в составе установки механизмов, которые вращаются (частей вакуумных насосов, водяных помп и другого силового оборудования), может создать другие источники акустического влияния на ВДП, кроме штатного ПМИ.

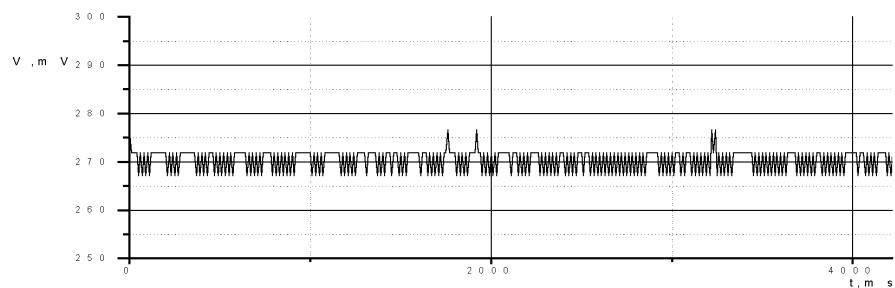
Для получения акустической обстановки на ВДП были смонтированы два датчика акустических колебаний, которые размещались на корпусах ВДП и ПМИ. Датчик №1 был смонтирован на токопроводе, который соединен с подвижной основой тигля, закрепленной на корпусе ВДП через сильфон. Датчик № 2 был размещен на фланце корпуса ВДП. Оба датчика были электроизолированы от печи и генератора на рис. 1.

Были измерены акустические спектры каждого возможного источника шума и их совместный сигнал.

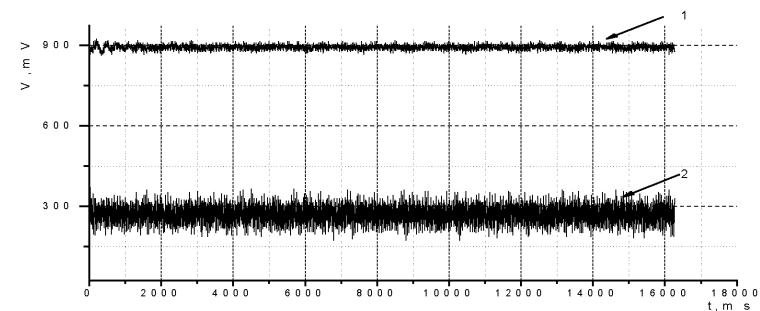
На рис. 2 представлены виды акустических сигналов и уровень их величин для: «нулевого фона» в районе установки – 2, а; 2, б – включения средств откачки и охлаждения (1 – сигнал от датчика № 1, 2 – сигнал от датчика № 2).



Рисунок 1



а)

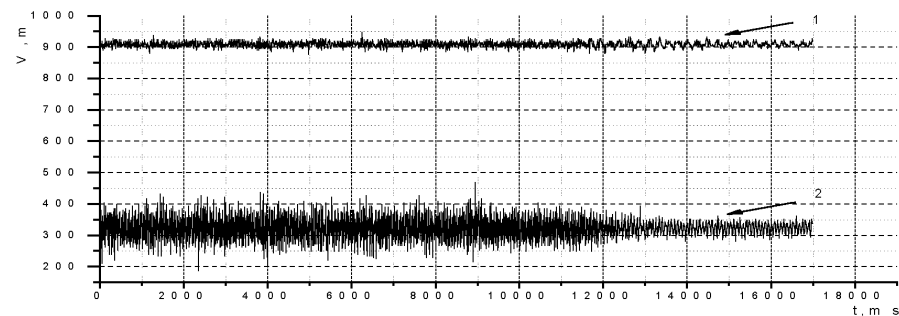


б)

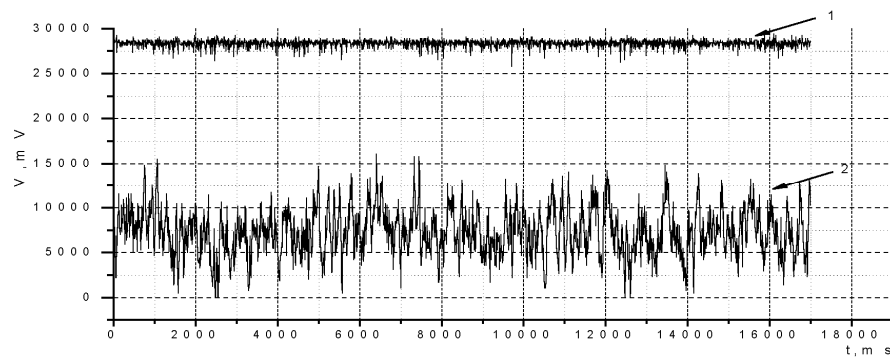
Рисунок 2

На рис. 3 представлены виды акустических сигналов и уровень их величин для 3, а – зажигания дуги и 3, б – Плавка СтЗ с акустическим воздействием (1 – сигнал от датчика № 1, 2 – сигнал от датчика № 2). Как и ожидалось амплитуда с датчика № 2 в несколько раз меньше, чем с датчика находящегося на токопроводе, что обусловлено наличием сильфона, который работает в режиме демпфера и гасит амплитуду акустических колебаний, нежелательных для системы вакуумной откачки вакуумно-дуговой печи.

Амплитуды сигналов при включении ПМИ в 50-100 раз выше уровня других сигналов, поэтому главная роль в изменении структуры слитков принадлежит сигналам ПМИ. За анализом спектров, явно прослеживаются две частоты: 90 и 2 Гц. 90Гц – это основная частота ПМИ и 2 Гц- собственные колебания установки. Повышение частоты колебаний для имеющегося ПМИ требует существенных конструкционных изменений, поскольку расчетное время необходимое сильфону для возврата в исходное положение, составляет 11мс, что и задает $f = 90 \text{ Гц}$



а)



б)
Рисунок 3

При рассмотрении процессов в зоне кристаллизации следует учесть: динамику расплава при вакуумной дуговой плавке металла и то же под действием акустических импульсов. В тигле во время переплава имеют место несколько потоков жидкого металла. Восходящий поток в центре, под электродом, радиальный поток направлен наружу, к стенкам тигля – в верхней части расплава, нисходящий поток у стенок тигля и сходящийся поток к центру- в нижней части расплава, у затвердевающей поверхности слитка. Пока не известны скорости этих потоков, но при скоростях около 3 м/с обычно начинаются кавитационные явления. Появление кавитационных полостей- уменьшает поверхностную адгезию жидкого металла с твердым основанием и при ударе – воздействии снизу – полость может схлопнуться, поскольку усилие создаваемое пневмомеханической системой для преодоления влияния вакуума создает вовремя возврата мембраны в верхнее положение силу способную сообщить жидкости ускорение 40 g, которое задается диаметром мембраны и весом присоединенной массы. Далее дно тигля, представляющее поршень уходит вниз с ускорением около 20-30 g, то есть на металл действует растягивающая сила и полость может возникнуть снова и даже увеличиться. Здесь мы не учитываем того, что из-за пульсаций тока – дуга колеблется по радиусу, что уменьшает силу сцепления жидкого металла с подложкой – дном – затвердевающей частью слитка. Именно эти радиальные перемещения жидкого металла снижают его сцепление с подложкой и способствуют образованию пустот, которые затем схлопываются. Именно эти микропустоты могут являться зародышами новой фазы и причиной исчезновения дендритов. Возможные варианты поведения формы капли расплава в тигле при акустическом воздействии – представлены на рис. 4. На рис.5 представлена макроструктура стали X18N10T (5, а – контрольный слиток, 5, б – слиток с динамической обработкой).

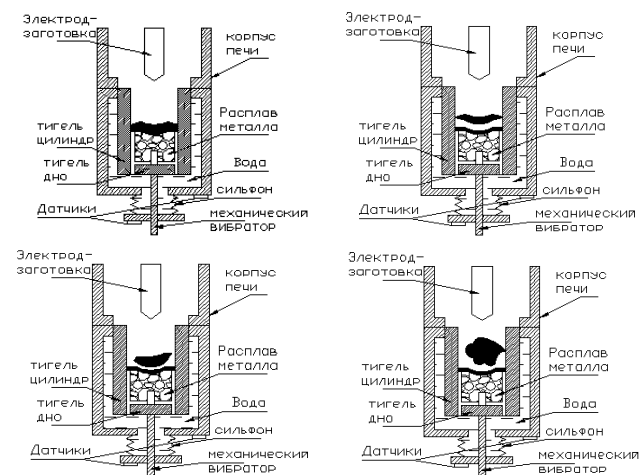


Рисунок 4

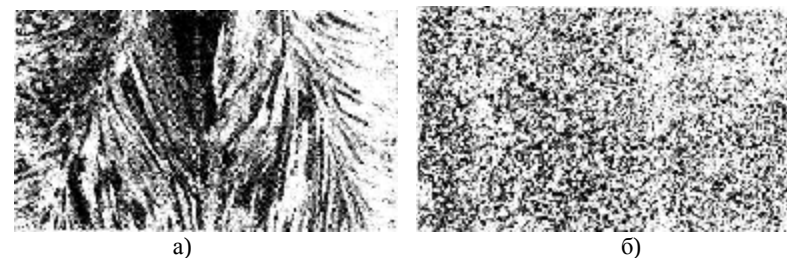


Рисунок 5

На рис. 6 представлены токовые характеристики вакуумно-дуговой плавки (шунт 500 А /75 mv), а – токовая характеристика во время горения дуги; б – токовая характеристика в момент гашения дуги.

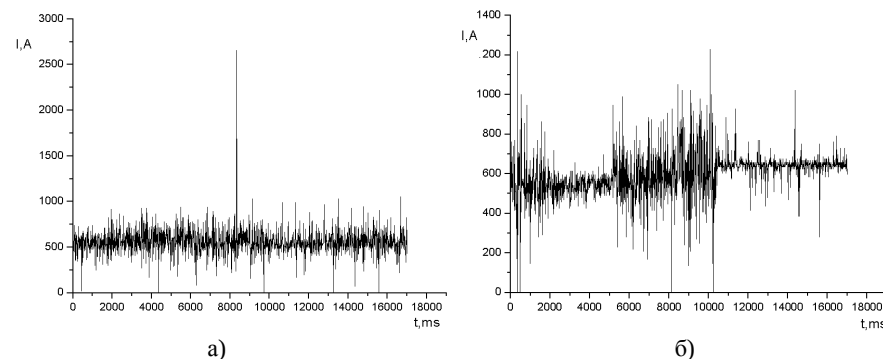


Рисунок 6

На рис. 7 представлены акустические сигналы от пневмомеханического вибратора – 1 и 2 – форма токового сигнала, зафиксированного в момент прекращения подачи питания, всплески тока обусловлены, по всей видимости, высокой степенью ионизации газа (амплитуда увеличена в 30 раз в сравнении с акустическим сигналом от излучателя).

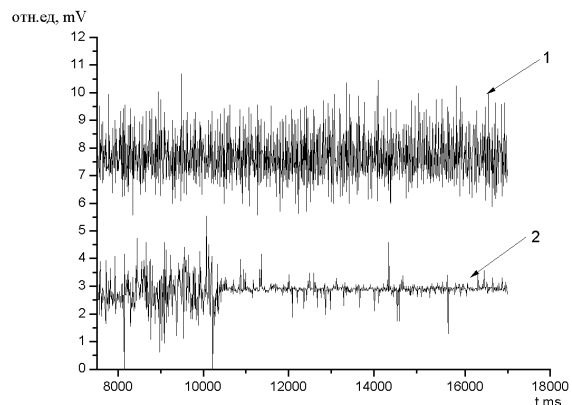


Рисунок 7

В момент гашения дуги появляются нестабильности тока, которые отображены на средней части рис. 6, б. Всплески сигналов длятся несколько секунд, до полного гашения дуги. Последующие токовые импульсные колебания могут быть связаны с пробоями по ионизированному газу. Источником пробоя могут быть процессы, которые возникают во время изменения одной кристаллической структуры на другую или во время термических напряжений возникающих в процессе термоусадки, которые приводят к появлению пылинок и микрокапель. Отрываясь они могут инициировать пробой, видимые на хвосте акустического сигнала рис. 7, б.

На рис. 8 представлена зарегистрированная частота пневмомеханического вибратора в процессе вакуумно-дуговой плавки (85 Гц).

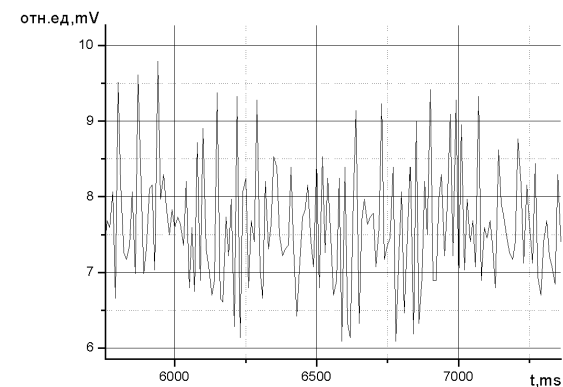


Рисунок 8

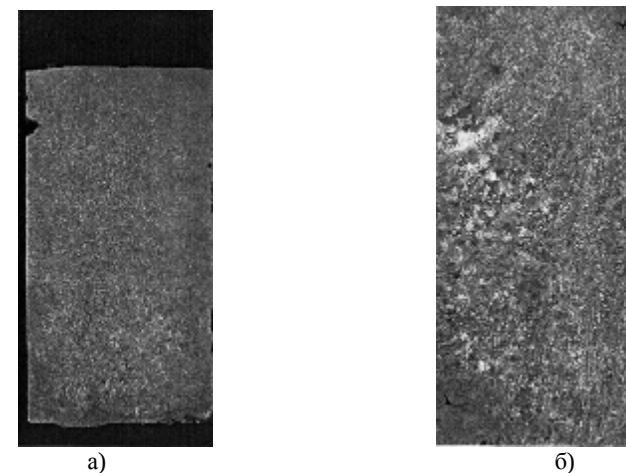


Рисунок 9

Из фото шлифов слитков на рис. 9 (а – слиток металла в условиях влияния акустического воздействия, б – плавка в свободных условиях. Скорость плавки – 30 см/час или 0,1 мм/сек.), которые получены на установке ВДП с системой акустического воздействия, (время плавки $T = 30$ мин, высота слитка $H = 15$ см, скорость $\sim 0,38$ см³/с) можно увидеть, что размер кристаллического зерна, полученный при акустическом воздействии уменьшился приблизительно в 2-3 раза. Но, размер зерна повышается с ростом высоты слитка или ростом присоединенной массы. Это свидетельствует о влиянии величины мощности акустического импульса на размер кристаллического зерна слитка.

Выводы:

1. Во время пневмомеханического воздействия на расплав осуществляется поличастотное воздействие, наряду с основной рабочей частотой излучателя – 85 Гц, также существуют частоты задаваемые электродвигателями дополнительных систем в основном 50 Гц, и собственная частота колебаний установки ~ 2 Гц.
2. Получены положительные результаты по уменьшению кристаллического зерна с помощью акустических импульсов в вакуумно-дуговых печах.
3. Оцененные величины энергии, которые вводятся в слиток (величина присоединенной массы – 5 кг, величина пневматической силы – 2000 Н) для пневмомеханического вибратора с двигателем – 1,2 кВт, равняется 13 Дж/имп., что является максимальной теоретической величиной, реальная – значительно меньше.
4. Нужны более мощные акустические импульсы, для получения более однородной структуры по всей высоте. Для этого можно использовать электрогидроимпульсную технологию.
5. Требуется дальнейшее проведение работ для получения необходимой информации для последующего внедрения разработки в промышленность.

Список источников информации: 1. Пилошенко В.Л., Смирнов А.Н. Оптимизация выбора технологической схемы виброимпульсной обработки для повышения качества промышленных слитков и заготовок // Металл и литейная Украина, 1997. – № 8. – С. 8-13. 2. Сладкошечев В.Г., Малюшевский П.П., Корытов В.А. и др. Разработка и исследование метода интенсификации процессов кристаллизации металлических расплавов и затвердевания слитков с помощью виброимпульсного воздействия // Новое в теории и практике электрогидравлического эффекта. – Киев: Наук. думка, 1983. – С. 96-99. 3. Электрогидроимпульсная обработка кристаллизующихся металлов и сплавов: Сб. науч. тр. / АН УССР. ПКБ электрогидравлики; Редкол.: Гулий Г.А. (отв. ред.) и др. – Киев: Наук. думка, 1990. – 100 с. 4. В.Б.Юферов, А.Н.Пономарев, Б.В.Борис, И.В.Буравиков, А.Ф.Ванжа, Е.В.Муфель, Г.В.Писарев Электрогидроимпульсная установка для обработки расплавов металлов в вакуумно-дуговых печах // Вестник НТУ «ХПИ». Сборник научных трудов. Тематический выпуск «Техника и электрофизика высоких напряжений». – № 20. – 2007. – 8 с.

Поступила в редакцию 16.10.2009

УДК 621.373.2

В.С.ГЛАДКОВ, канд.техн.наук, вед.науч.сотр., НТУ «ХПИ»;
А.А.ГУЧЕНКО, зав.сектором, НТУ «ХПИ»;
А.В.ШЕСТЕРИКОВ, науч.сотр., НТУ «ХПИ»;
В.Я.ХАЙЛО, вед.инж., НТУ «ХПИ»;
МАРКУС ШТИМЕР, докт.физ.-мат.наук, проф., Технический университет Дортмунда, Германия

ВЫСОКОПOTЕНЦИАЛЬНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР НАПРЯЖЕНИЕМ 100 КВ

Описаний високопотенційний трансформатор 220В/220В напругою 100 кВ й потужністю 100 Вт.

The results of theoretical study of transmission properties of the ohmic voltage divider type of SGL-1 for rated voltage of 1 MV are given.

В настоящее время в связи с развитием нанотехнологий в различных отраслях науки и техники возникла потребность в применении ускорителей электронов, протонов, ионов водорода, гелия и др. заряженных частиц. А это повлекло за собой необходимость создания высокопотенциальных (изолирующих) трансформаторов 220В/220В напряжением 50-100 кВ и мощностью до 100 Вт для питания инжекторов частиц. Потенциальные трансформаторы нашли также применение в системах управления и диагностики электрофизических установок экологически чистой и безотходной утилизации железобетонных (бетонных) изделий при воздействии наносекундных импульсов напряжения, а также в цепях питания высоковольтной аппаратуры установок экологически чистой фильтрации трансформаторного масла.

Известно, что к высокопотенциальным трансформаторам относятся трансформаторы, у которых потенциал вторичной обмотки по отношению к первичной превышает 1000 В. Основными особенностями высокопотенциальных трансформаторов по сравнению с трансформаторами, работающими при напряжении до 1000 В, являются увеличенные изоляционные расстояния и, как следствие, значительное уменьшение коэффициента заполнения окна магнитопровода медью, увеличение относительного значения падения напряжения в обмотках трансформатора, изменение оптимальных геометрических соотношений между размерами высокопотенциальных трансформаторов по сравнению с низковольтными трансформаторами, наличие в изоляции трансформаторов дополнительных диэлектрических потерь и потерь на сквозную проводимость и ионизацию.

В результате уменьшения коэффициента заполнения окна и увеличения падения напряжения в обмотках удельная мощность высокопотенциальных трансформаторов уменьшается, а их габаритные размеры и масса значительно

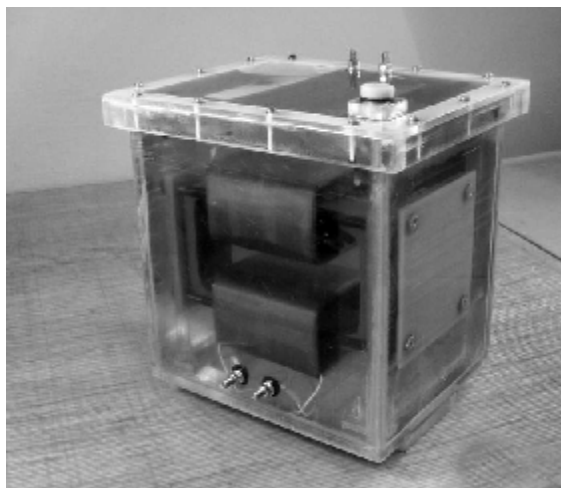
возрастают. С увеличением габаритных размеров магнитопровода возрастает реактивная составляющая тока холостого хода, увеличиваются потери в магнитопроводе и обмотках, то есть энергетический КПД трансформаторов уменьшается. Нужно отметить, что отличительной особенностью высокопотенциальных трансформаторов является преимущественное применение стержневых магнитопроводов в отличие от низковольтных трансформаторов, в которых наиболее часто применяется броневые магнитопроводы.

В качестве основного диэлектрика потенциальной обмотки от первичной обмотки и корпуса применяется как бумажномасляная, так и твердая (на основе эпоксидных компаундов) изоляция. При этом литературные источники рекомендуют твердую изоляцию использовать в высокопотенциальных трансформаторах в основном при напряжениях до 30 кВ [1]. Но в 2007 г. в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» разработаны, изготовлены и успешно эксплуатируются у заказчика высокопотенциальные трансформаторы с твердой (эпоксидной) изоляцией напряжением 50 кВ для питания инжекторов ионов водорода и гелия в ускорителе на 50 кэВ [2].

Бумажно-масляная изоляция применяется в высокопотенциальных трансформаторах напряжением 100 кВ и выше [3].

В настоящее время при разработке некоторых видов нанотехнологий возникла потребность в применении ускорителей ионов энергией 100 кэВ. Для питания инжекторов этих ускорителей понадобились высокопотенциальные трансформаторы на 100 кВ, которые бы удовлетворяли ряду условий:

- минимально возможный вес;
- простота изготовления;
- надежность в работе;
- минимально возможная высота и др.



Общий вид высокопотенциального трансформатора напряжением 100 кВ с масляной изоляцией

С учетом этих условий был разработан и создан (см. рисунок) высокопотенциальный трансформатор 220 В/220 В напряжением 100 кВ и мощностью 100 Вт в изоляционном корпусе с масляной изоляцией обмоток от магнитопровода и между ними, что позволило исключить процесс сушки и вакуумирования изоляции (в отличие от использования бумажно-масляной изоляции).

Впервые изоляция первичной и вторичной обмоток была выполнена на напряжение 50 кВ каждая, а не изолировалась на полное напряжение 100 кВ только одна вторичная. Это позволило значительно уменьшить весогабаритные характеристики трансформатора.

Список литературы: 1. И.И.Белопольский, Е.И.Каретникова, Л.Г.Пикалова Расчет трансформаторов и дросселей малой мощности. – М.: «Энергия», 1973. – 400 с. 2. В.С.Гладков, А.А.Гученко, В.Я.Хайло Компактный источник питания ускорителей ионов гелия и водорода энергией 50 кэВ // Вестник НТУ «ХПИ». – 2008. – № 21. – С. 43-49. 3. В.А.Бочаров, В.С.Гладков, Ю.П.Зябко, П.Н.Мельников Высоковольтный источник питания ускорителя положительных ионов // Приборы и техника эксперимента – М.: 1999. – № 2. – С. 160-161.

Поступила в редколлегию 18.08.2009

УДК 621.315.615:2.004.1

В.С.ГЛАДКОВ, канд.техн.наук, пров.наук.співр, НТУ «ХПИ»;
О.А.ГУЧЕНКО, зав.сектором, НТУ «ХПИ»;
О.В.ШЕСТЕРІКОВ, наук.співр., НТУ «ХПИ»

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ЗРАЗКА УСТАНОВКИ ОЧИЩЕННЯ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА

Наведено результати експериментальних досліджень очищення трансформаторного масла на створеному макеті електрофізичної установки, які показали високу ефективність очищення.

The experimental results of purification of transformer oil to create model of electrophysical installation, which showed high cleaning efficiency are given.

Вступ. Метою цієї роботи є експериментальна перевірка ефективності електрофізичного очищення трансформаторного масла за допомогою запропонованої в [1] системи електродів типу «квадрупольна лінза», яка дозволяє створювати просторове неоднорідне електричне поле в усьому об'ємі системи електродів.

Типову картину неоднорідного електростатичного поля в системі квадрупольної лінзи наведено на рис.1. [2]

У такій системі подовжня складова поля відсутня, тому потенціал на осі буде постійним. Напруженість поля в декартовій системі координат з центром

на осі симетрії визначається виразом

$$E(x, 0) = \frac{2U}{l} \sqrt{x^2 + 0^2}, \quad (1)$$

де U – напруга, l – довжина проміжка, x, y – координати.

Розглянемо рух позитивного іона, який входить у поле зі швидкістю, що паралельна осі Z . Якщо він вступає в поле в точці P_1 , то на нього буде діяти сила, яка відхиляє його до осі Z . Тобто, в площині XZ поле збирає позитивно заряджені частки, а в площині YZ воно їх розсіює. Якщо іон знаходиться в якій-небудь точці, що не лежить у жодній з площин симетрії, то на нього діє сила, яка відхиляє його від площини XZ і наближує до площини UX . Внаслідок цього, будь-яка заряджена частка при будь-якому відхиленні від осі Z буде рухатися до електродів.

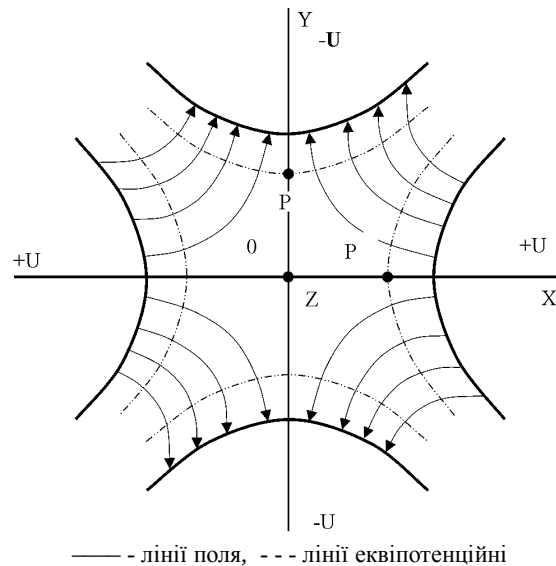


Рисунок 1 – Електричне поле квадрупольної системи електродів

Якщо розглядати краплі вологи та домішки радіуса a як диполі з моментом P , то сила, з якою діє електричне поле E , має вигляд [2]

$$F_1 = 4pa^3eF \frac{dE}{dx}, \quad (2)$$

де ε – діелектрична проникність.

У той же час на краплі вологи та домішки діє гравітаційна сила [2]

$$F_q = \frac{4}{3}pa^3(r_a - r_i), \quad (3)$$

де ρ_v – густина вологи (чи домішок), ρ_m – густина трансформаторного ма-

сла, q – прискорення сили тяжіння.

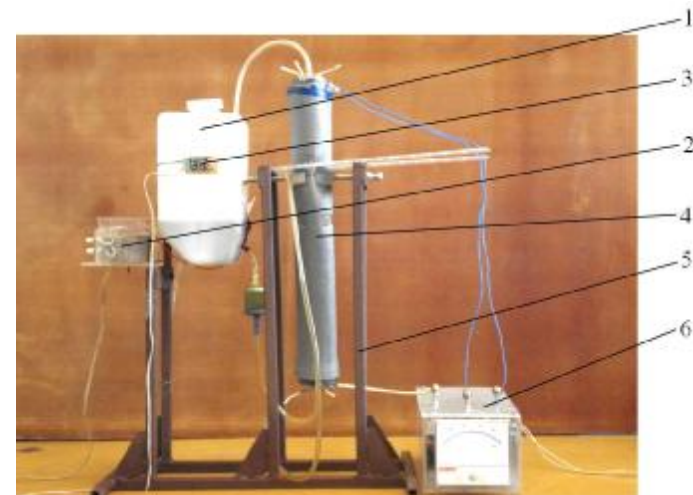
Для визначення гравітаційної сили, яка діє на домішки в (3) ρ_v треба замінювати на густину домішки ρ_s .

При $F_1 > 0$ краплі вологи та домішки будуть рухатися до електродів і створювати ланцюжки (за умови групування [2])

$$U = \sqrt{\frac{l^2}{12x} \frac{r_a - r_i}{e}} q. \quad (4)$$

У центрі квадрупольної лінзи напруженість електричного поля дорівнює 0, тому крапля вологи (чи частка домішок), що знаходиться там, рухається тільки під дією сили F_q . Але це становище нестійке, тому крапля вологи (частка домішок) при найменшому відхиленні від осі симетрії починає рухатися до електрода за траєкторією, яка наближується до горизонтальної лінії при своєму просуванні до електрода. Коли краплі вологи (частки домішок) досягнуть електрода, то вони змінять первісну картину поля, тобто збільшать неоднорідність електричного поля. Краплі вологи (частки домішок), що знаходяться навколо цих крапель, будуть прямувати до них, створюючи ланцюжки (укрупнення), які під дією сили F_q будуть осідати.

Основна частина. Для експериментальної перевірки ефективності просторової системи електродів для електрофізичної фільтрації трансформаторного масла було розроблено та виготовлено експериментальний зразок установки очищення трансформаторного масла (див. рис. 2). Критерієм оцінювання ефективності системи електродів служила якість очищення, яка перевірялася в лабораторії контролю якості АТЗТ «ЕТМА» на аналізаторі ФС-151 на відповідність ГОСТ 17216-71.



1 – резервуар для масла, яке очищується, 2 – джерело живлення насосу, 3 – давач температури, 4 – електрофізичний фільтр у термоізоляційній оболонці, 5 – несна конструкція, 6 – високовольне джерело енергії.
Рисунок 2 – Загальний вигляд експериментального зразка установки очищення трансформаторного масла

Експериментальні дослідження показали, що система просторових електродів типу «квадрупольна лінза» (з 4-х електродів), чи інші системи, які є кратними квадрупольній лінзі з 4-х електродів, дозволяють проводити глибоку фільтрацію трансформаторного масла. Після того, як була встановлена найбільш оптимальна система електродів у фільтр експериментального зразка, дослідження проводилося за температури +50 °С в такому порядку:

- вихідне масло піддавалося дії електричного поля протягом 1 години при швидкості течії 6 л/год. (напруга живлення насосу 2 В);
- вихідне масло піддавалося дії електричного поля протягом 3 годин при швидкості течії 9 л/год. (напруга живлення насосу 3 В).

Результати цих досліджень фіксувалися в протоколах випробування трансформаторного масла на вміст механічних домішок на аналізаторі ФС–151. Аналіз результатів випробування показав:

- в результаті обробки масла протягом 1-єї години його якість підвищилася з 11 класу чистоти до 9 класу чистоти, тобто це масло можна заливати в потужні трансформатори класів 330 кВ та 500 кВ;
- підвищення швидкості течії масла в 1,5 рази зі збільшенням часу дії електричного поля в 3 рази дало такий самий результат (клас чистоти масла), що і при швидкості течії 6 л/год. з часом дії поля протягом 1-єї години.

Було також проведено очищення за температури +50 °С дуже брудного масла від Харківобленерго, непрозорість якого не дозволяла проводити його аналіз на аналізаторі ФС-151 через технічні можливості останнього. В результаті очищення масла на експериментальному зразку установки при швидкості 6 л/год. протягом 3 годин його якість підвищилася до 10 класу чистоти.

Основні висновки:

1. Створений експериментальний зразок установки електрофізичного очищення трансформаторного масла дозволяє проводити експериментальні дослідження процесів очищення масла в залежності від часу дії електричного поля, швидкості течії та температури.

2. Проведені експериментальні дослідження показали:

- запропонована конфігурація системи просторових електродів типу «квадрупольна лінза» ефективно очищує трансформаторне масло від забруднень різного походження;
- задану продуктивність очищення трансформаторного масла у реальних установках фільтрації можна отримувати використанням паралельно з'єднаних систем просторових електродів типу «квадрупольна лінза»[3].

Список літератури: 1. Гладков В.С., Гученко А.А., Шестеріков А.В. та ін. Розробка енергозберігаючих електрофізичних способів фільтрації та вимірювання газового вмісту у діелектричних рідинах, Звіт з НДР // НТУ «ХПІ», Харків, ГР № 0208U006806. – 2008р. – 71 с. 2. Кельман В.М., Явор С.Я. Электронная оптика. – Ленинград, Наука, 1968. – 488 с. 3. Гладков В.С., Вавріє Л.В., Гученко А.А., Шестеріков А.В. К вопросу о выборе системы электродов для электрофизических устройств электрической обработки трансформаторного масла // Вестник НТУ «ХПИ». – 2007. – № 34. – С. 35-38.

Надійшла до редколегії 30.10.2009

УДК 621.317.7

Н.Д.ЖИВОТОВ, НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ»;
Ю.С.НЕМЧЕНКО, НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ»;
А.И.САРАЕВ, НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ»

ОТКРЫТАЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ПЛОЩАДКА

Створено майданчик для вимірювання напруженості поля індустриальних радіозавад в смузі частот від 9 кГц до 1 ГГц, який повністю відповідає вимогам міжнародного стандарту CISPR–16–1–1999.

Area for measurement of the tension of the field industrial radio disturbances in band of the frequencies from 9 kHz to 1 GHz is created, and she completely meets the demands of international standard CISPR–16–1–1999.

Постановка задачи. Измерения напряженности поля промышленных радиопомех (ИРП) в полосе частот от 9 кГц до 1 ГГц проводят на открытых измерительных площадках (ОИП) стандартных размеров и удовлетворяющих требованиям к затуханиям, установленным в CISPR-16-1-1999 [1].

ОИП должна быть равной и оборудована проводящей поверхностью (пластиной заземления) выполненной из металла. Проводящая поверхность должна закрывать полностью всю площадь между испытываемым ТС и антенной.

Подготовка к измерениям. В высоковольтном зале НИПКИ «Молния» построена открытая измерительная площадка. Проводящая поверхность площадки выполнена из листового металла размером 4×6,5 м и установлена на изоляторы высотой 1 м. Величина неровностей площадки не превышает 0,15 λ (4,5 см) для частоты 1000 МГц.

В соответствии с CISPR-16-1-1999 для измерения затухания ОИП применяются две антенны: приемная и передающая. При этом передающая антенна должна устанавливаться на высоте 1 м при горизонтальной поляризации, и на высоте 1,25 м при вертикальной поляризации, а приемная антенна должна быть смонтирована на непроводящей мачте, которая должна обеспечивать подъем антенны от 1 до 4 м. ОИП аттестовалась для стандартного измерительного расстояния 3 м между передающей и приемной антеннами.

Обе антенны были соединены со стандартными измерительными приборами антенными кабелями, которые при измерениях в соответствии с CISPR–16–1–1999 были проложены ортогонально продольным осям элементов антенн, а расстояние между задней кромкой антенны и вертикальным сн-

жением кабеля составило 1 м.

В качестве приемной и передающей антенн использовались два одинаковых комплекта стандартных дипольных широкополосных антенн DP1 и DP3 с диапазоном частот, соответственно, 26-300 МГц и 300-1000 МГц.

Проведение измерений. Схема измерений методом дискретных частот приведена на рис. 1 и 2.

К передающим антеннам DP1 и DP3 подключались антенным кабелем длиной 10 м, поочередно генераторы ГЧ-107 и ГЧ-129, а к приемным антеннам DP1 и DP3 подключался таким же кабелем селективный микровольтметр SMW 8.5. Дипольные антенны DP1 и DP3 настраивались на требуемую частоту. При вертикальной поляризации эти антенны устанавливались на минимальную высоту 1,25 м, чтобы обеспечить зазор не менее 25 см по отношению к земле.

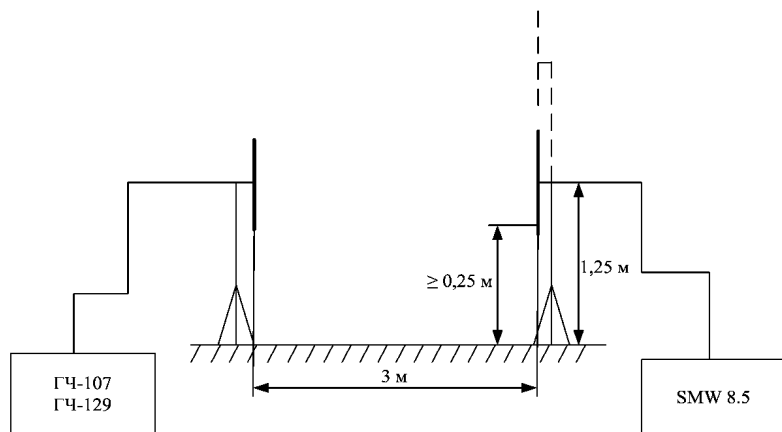


Рисунок 1 – Схема измерения затухания площадки при горизонтальной поляризации

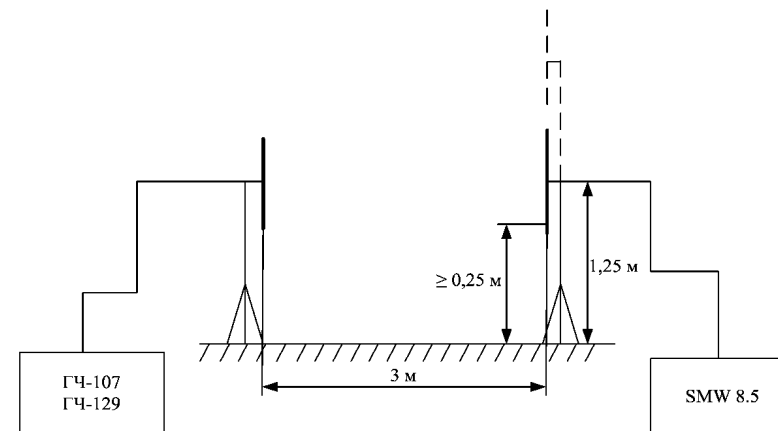


Рисунок 2 – Схема измерения затухания площадки при вертикальной поляризации

Измерения проводились на частотах, указанных в табл.1, для горизонтальной, а затем вертикальной поляризации антенн. На выбранной частоте измерений при подсоединенных к антеннам кабелях устанавливали выходной уровень генератора сигналов так, чтобы на селективном микровольтметре получить отсчет не менее 20 – 30 дБ. Сканировали приемную антенну по высоте и фиксировали максимальное показание микровольтметра U_{R1} .

Затем отключали кабели от антенн и соединяли их между собой с помощью коаксиального перехода. Фиксировали показания микровольтметра U_{R2} .

Затухание площадки $A_э$ вычисляли по формуле:

$$A_э = U_{R2} - U_{R1} - K_{пер} - K_{пр},$$

где $K_{пер}$ и $K_{пр}$ – коэффициенты калибровки соответственно передающей и приемной антенн, взятых из прилагаемых к этим антеннам графиков, дБ.

Вычисленные значения $A_э$ сравнивали с расчетными A_n , указанными в табл. 1 (эта таблица взята из стандарта CISPR-16-1-1999).

Таблица 1 – Расчетные величины затухания площадки

Частота, МГц	Затухание A_n , дБ при поляризации	
	горизонтальной	вертикальной
30	15,8	8,2
35	13,4	6,9
40	11,3	5,8
45	9,4	4,9
50	7,8	4,0
60	5,0	2,6
70	2,8	1,5
80	0,9	0,6
90	-0,7	-0,1

100	-2,0	-0,7
120	-4,2	-1,5
140	-6,0	-1,8
160	-7,4	-1,7
180	-8,6	-1,3
200	-9,6	-3,6
250	-11,9	-7,7
300	-12,8	-10,5
400	-14,8	-14,0
500	-17,3	-16,4
600	-19,1	-16,3
700	-20,6	-18,4
800	-21,3	-20,0
900	-22,5	-21,3
1000	-23,5	-22,4

Вывод: Из табл. 2 видно, что наша ОИП при измерительном расстоянии 3 м соответствует CISPR-16-1-1999, так как на всех частотах от 30 МГц до 1 ГГц абсолютное значение разности между измеренным затуханием площадки A_z (для горизонтальной и вертикальной поляризации) и его теоретическим значением не превышает 4 дБ, что обусловлено требованиями CISPR-16-1-1999. Таким образом наша ОИП пригодна для измерения промышленных радиопомех от различного рода технических средств в соответствии со всеми действующими стандартами на промышленные радиопомехи, например, ДСТУ CISPR-22:2007 [2] и ГОСТ 16842-2002 [3].

Результаты измерений для всего ряда частот приведены в прилагаемой табл. 2, где Г – горизонтальная, а В – вертикальная поляризации.

Таблица 2 – Результаты измерений затухания площадки

Частота, МГц	Поляризация	U_{R1} , дБ/мкВ	U_{R2} , дБ/мкВ	$K_{пер}$, дБ/мкВ	$K_{пр}$, дБ/мкВ	A_z , дБ/мкВ	$A_n - A_z$, дБ/мкВ
30	Г	44	110	24,5	24,5	17	1,2
	В	52	110			9	0,8
35	Г	60	114	21	21	12	1,4
	В	68	114			4	2,9
40	Г	60,5	110	20	20	9,5	1,8
	В	66	110			4	1,8
45	Г	62	110	20,3	20,3	7,4	2
	В	64	110			5,4	0,5
50	Г	61	110	19	19	11	3,2
	В	66	110			6	2
60	Г	66	110	18	18	8	3
	В	69	110			5	2,4
70	Г	74	114	18	18	4	1,2

	В	73	114			5	3,5
80	Г	95	110	7	7	1	0,1
	В	93	110			3	2,4
90	Г	93	109	8	8	0	0,7
	В	90	109			3	3,1
100	Г	93	111	9	9	0	2,0
	В	91	111			2	2,7
120	Г	85	105	10,8	10,8	-1,6	2,6
	В	86	105			-2,6	1,1
140	Г	85,5	104	12	12	-5,5	0,5
	В	84	104			-4	2,2
160	Г	91	111	13	13	-6	1,4
	В	89	111			-4	2,3
180	Г	86	110	14,5	14,5	-5	3,6
	В	86	110			-5	3,7
200	Г	85	110	15,5	15,5	-6	3,6
	В	86	110			-7	3,4
250	Г	82	109	17,5	17,5	-8	3,9
	В	83	109			-9	1,3
300	Г	75	107	21	21	-10	2,8
	В	74	107			-9	1,5
400	Г	74,5	106	22,5	22,5	-13,5	1,3
	В	72	106			-11	3,0

Продолжение таблицы 2

Частота, МГц	Поляризация	U_{R1} , дБ/мкВ	U_{R2} , дБ/мкВ	$K_{пер}$, дБ/мкВ	$K_{пр}$, дБ/мкВ	A_z , дБ/мкВ	$A_n - A_z$, дБ/мкВ
500	Г	64,5	99	24	24	-13,5	3,8
	В	65	99			-14	2,4
600	Г	59	94	25,5	25,5	-16	3,1
	В	63	94			-20	3,7
700	Г	43	80	27	27	-17	3,6
	В	44	80			-18	0,4
800	Г	20	54	29	29	-24	2,7
	В	19	54			-23	3,0
900	Г	61	100	30,5	30,5	-22	0,5
	В	60	100			-21	0,3
1000	Г	60	100	32,5	32,5	-25	1,5
	В	61	100			-26	3,6

Список литературы: 1. CISPR-16-1:1999 International electrotechnical commission. Information technology equipment – Radio disturbance characteristics – Limits and methods of measurement. 2. ДСТУ CISPR-22:2007 International electrotechnical commission. Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods - Part 1: Radio disturbance and immunity measuring apparatus. 3. ГОСТ 16842-2002 Радиопомехи промышленные. Методы испытаний источников промышленных радио-

УДК 621.315

В.М.ЗОЛОТАРЕВ, канд.техн.наук, ген.директор, ЗАО завод «Южкабель», Харьков

РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ПРОИЗВОДСТВА КАБЕЛЕЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 330 КВ

Викладені практичні аспекти вирішення проблеми створення виробництва в Україні кабелів з ізоляцією із зшитого поліетилену.

The practical aspects of designing XLPE-cable in Ukraine are described.

Концентрация электрических мощностей на современном этапе развития достигла такой степени, что необходимы кардинальные решения в области совершенствования канализации энергопоток. На сегодняшний день решать задачи передачи и особенно распределения электроэнергии с помощью одних только традиционно применяемых для этой цели открытых воздушных ЛЭП становится практически невозможно. Все возрастающие требования ставят на повестку дня необходимость сооружения современных безопасных каналов передачи электрической энергии в виде кабельных линий. Основной элементной базой последних являются современные силовые кабели энергетического назначения, а разработка и освоение их выпуска напрямую связаны с повышением надежности и безопасности отечественных кабельных линий электропередачи.

Суть проблемы. На момент обретения независимости в Украине выпускались в основном силовые кабели с бумажной пропитанной изоляцией на напряжение до 10 кВ с секторными жилами, кабели с изоляцией из линейного полиэтилена с секторными жилами на напряжение до 3 кВ или с круглыми жилами на напряжение до 10 кВ. Силовые кабели с ПВХ изоляцией выпускались максимум на напряжение в 6 кВ. Все эти кабели являлись трехжильными и имели сечение жилы до 240 мм² и невысокую теплостойкость, что не удовлетворяло потребностям отечественной электроэнергетики и в первую очередь в части рабочих напряжений, низких эксплуатационных качеств и низких передаваемых мощностей. Главным препятствием на пути совершенствования существующих и создания новых конструкций кабелей и повышения их пара-

метров было отсутствие промышленных технологий переработки и наложения нагревостойкой изоляции с высокими диэлектрическими свойствами. С освоением химических предприятиями выпуска компонент, позволяющих с помощью их экструзионной переработки получать непосредственно на кабельных предприятиях сшитый полиэтилен, появились широкие возможности освоения новых технологий изготовления силовых кабелей энергетического назначения, и кардинального улучшения их технико-экономических показателей в целом.

Решение проблемы. Повышение технико-экономических показателей силовых кабелей энергетического назначения проводилось следующими путями:

- усовершенствование существующих конструкций кабелей и использование для их изготовления новых технологий;
- разработка новых конструкций экранированных кабелей;
- разработка и использование новых первичных компонент;
- построение новых технологических схем, принципов и циклов производства;
- разработка новых электротехнологических комплексов массового производства кабелей;
- разработка нормативной базы;
- разработка испытательной базы.

В общей схеме основных технологических процессов (рис. 1) можно выделить следующие структурные части: первичные компоненты, цикл изготовления сплошных токопроводящих жил (ТПИС) малых сечений и проволоки, циклы изготовления кабелей на напряжение до 10 кВ, напряжением 6...110 кВ и на напряжение до 330 кВ, а также цикл переработки отходов, которые

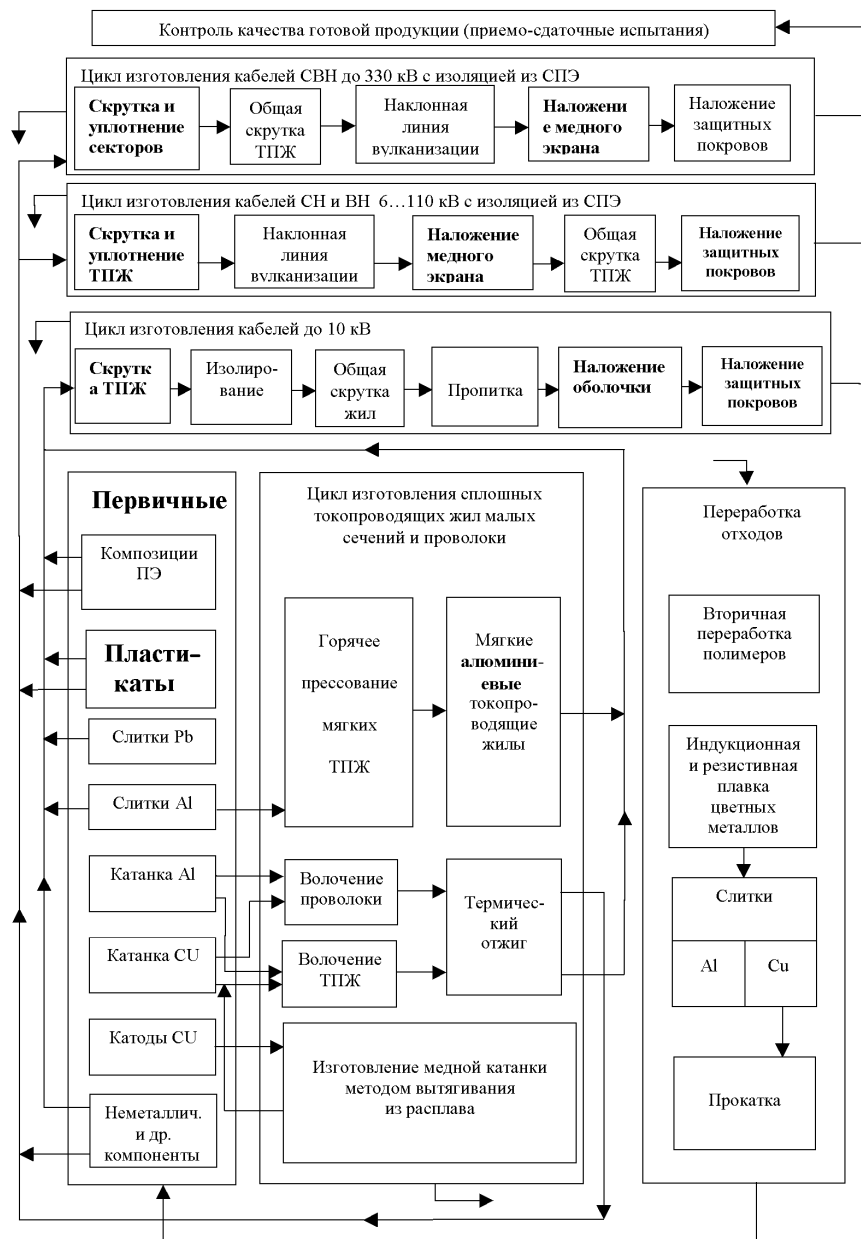


Рисунок 1 – Общая схема основных технологических процессов и циклов производства кабелей энергетического назначения с бумажной пропитанной и пластмассовой изоляцией

неизбежно появляются в процессе производства. Каждый из циклов изготовления кабелей завершается контролем качества готовой продукции и приемо-сдаточными испытаниями всех строительных длин и отрезков. Рассмотрим упомянутые структурные части более подробно.

Первичные компоненты. Для изготовления изоляции из сшитого полиэтилена применены как импортные компоненты (для силанольной и пероксидной сшивки), так и разработанные собственные составы на основе полиолефинов и органосиланов [1-4]. Для улучшения, в первую очередь, пожаробезопасности кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена были разработаны составы на основе поливинилхлоридного пластиката [5, 6]. Во всех этих разработках использовалась отечественная сырьевая база. Свойства таких материалов рассмотрены в [7, 8, 9].

Для изготовления свинцовых и алюминиевых оболочек кабелей с бумажно-масляной изоляцией по традиционной технологии прессования используются соответственно свинцовые и алюминиевые слитки. Новым является использование медных катодов для изготовления катанки методом вытягивания из расплава. К традиционно используемым неметаллическим исходным компонентам относится кабельная бумага для изоляции и проводящая бумага для экранов кабелей с бумажной пропитанной изоляцией, компоненты для приготовления пропиточных составов (в том числе нестекающих), изготовления защитных покровов и пр. К новым относятся материалы (нити и полотна) для водоблокирования в кабелях 6... 110... 330 кВ, металлополимерные пленки и т.п.

Цикл изготовления сплошных ТПЖ малых сечений и проволоки **существенно модернизирован за счет применения:**

- технологии горячего прессования алюминиевых ТПЖ сечением 30...240 кв.мм и катанки сечением более 30 кв.мм из алюминиевых слитков;
- применения безотходного процесса использования слитков алюминия за счет внедрения ЗАО завод «Южкабель» на Запорожском алюминиевом комбинате технологии безокислительного непрерывного литья слитков, что позволило полностью отказаться от их обточка и исключить целый производственный участок;
- применения высокопроизводительного волочильного оборудования и встроенного непрерывного термического отжига жил и медной проволоки в паровой среде;
- применение прогрессивного процесса изготовления мягкой медной катанки методом вытягивания из расплава (метод up cast).

Сюда следует отнести также применение алмазных волок с большим диаметром калибрующего пояса (до 6 мм) для волочения, а также уплотнения алюминиевых ТПЖ сечением до 120 кв.мм, например, для изготовления самонесущих изолированных проводов.

Вопросы, связанные с расчетом усилий волочения, допустимых обжатий,

разработки методик определения параметров волочения и выбора переходов на основе вариационного принципа рассмотрены в [10-18].

Применение процесса волочения дает возможность получать всю необходимую номенклатуру проволоки и фасонных токопроводящих жил сечением до 50 кв.мм из медной катанки.

Сплошные фасонные токопроводящие жилы в диапазоне сечений 70...240 кв.мм и всю номенклатуру катанки из алюминия дает возможность получать процесс горячего прессования из слитков на разработанной технологической линии.

В основу работы такой технологической линии положен принцип формообразования мягких изделий (секторных токопроводящих жил и других изделий) путем горячего прессования алюминиевых слитков. Линия состоит из гидравлической прессовой установки (собственно гидравлического пресса), системы гидравлики, печи индукционного нагрева слитков, приемного устройства, системы электропитания и системы управления (рис. 2).

Гидравлическая прессовая установка состоит из главного силового цилиндра 1, с поршнем 2 и прессштемплем, контейнера 3 с гильзой 4 и элементами индукционного подогрева контейнера 5 током промышленной частоты I_k , передней траверзы 6, матрицы 7. Для замены матрицы предусмотрены два вспомогательных гидроцилиндра (на рис. не показаны), обеспечивающие необходимое перемещение передней траверзы. Еще один вспомогательный гидравлический цилиндр используется как привод механизма подачи слитков от входа к выходу печи индукционного нагрева слитков. Основным узлом системы гидравлики является трехплунжерный насос Г-305А, развивающий давление 320 атм при подаче рабочей жидкости (минерального масла) 750 л/мин. Здесь же имеется также гидронасос механизма подачи слитков, обеспечивающий подачу рабочей жидкости 100 л/мин при давлении 25 атм. Основным элементом печи индукционного нагрева слитков является водоохлаждаемый индуктор 8. В электроприводе системы гидравлики использован двигатель постоянного тока МП 49,70-6К мощностью 500 кВт и скоростью вращения 315/1000 об/мин, питаемый напряжением 440 В. Система электропитания обеспечивает подачу и распределение промышленного трехфазного напряжения 50 Гц, 380 В между системами, узлами и элементами линии и их защиту в аварийных режимах работы.

Работает линия следующим образом. Алюминиевые слитки (5 штук подряд один за другим) подаются толкателем 9 механизма подачи слитков в печь индукционного нагрева, которая обеспечивает их основной нагрев до температуры 420°C. Для лучшей распрессовки в гильзе контейнера и во избежание образования воздушных раковин, перед подачей слитка в контейнер, передняя часть его нагревается до более высокой температуры, составляющей примерно 450°C. Этот, так называемый градиентный нагрев слитка, обеспечивается переключением числа витков индуктора 9 с помощью тиристорных коммутаторов узла управления нагревом слитков. Подготовленный таким способом сли-

ток движется сам по направляющим роликам, как показано стрелкой и устанавливается на оси прессштемполя и матрицы 7. Прессштемпель, приводимый в движение поршнем главного силового цилиндра подает слиток во внутреннюю полость гильзы 4 контейнера 3. После этого начинается прессование слитка на

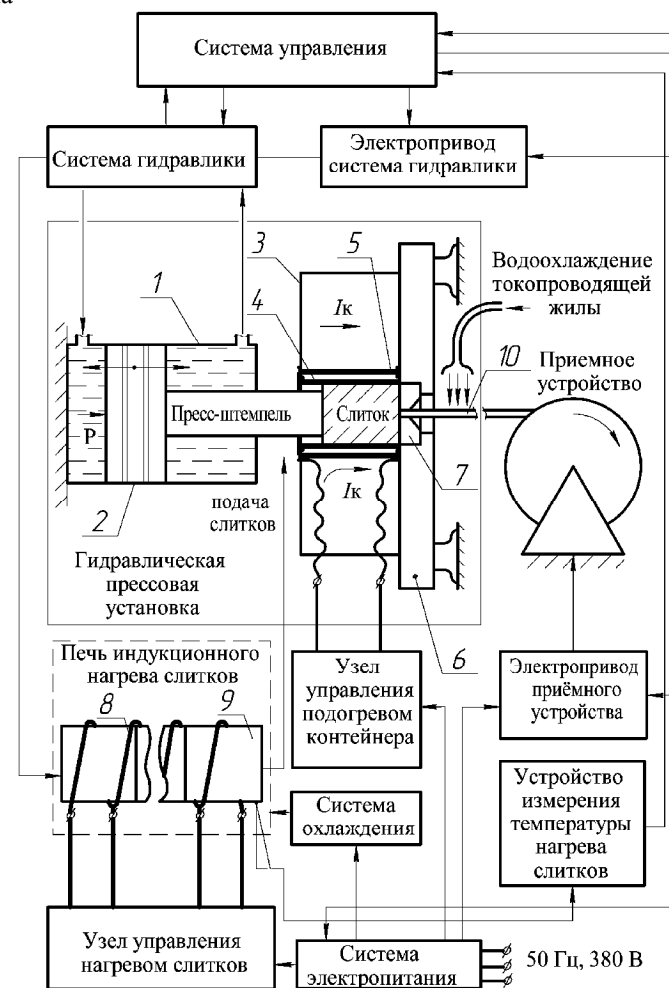


Рисунок 2 – Структурная схема технологической линии изготовления токопроводящих алюминиевых жил методом горячего прессования

прямой матрице 7 усилием P , развиваемым поршнем главного силового цилиндра 1, максимальное значение которого составляет 1250 т. Так как передняя часть слитка нагрета сильнее, то именно в этой части происходит заполне-

ние гильзы алюминием и его выдавливание через матрицу 7. Синхронно с движением прессштемпера начинается работать приемное устройство и готовая выпрессованная токопроводящая жила 10 укладывается на барабан (№ 14... № 20), устанавливаемый на этом приемном устройстве. Сразу после выхода из матрицы токопроводящая жила в процессе движения охлаждается водой. После выпрессовывания слитка в гильзе остается некоторый пресс-остаток. Прессштемпер отводится назад и механизм подачи слитков подает следующий нагретый до необходимой температуры слиток. Прессштемпер снова подает слиток в гильзу контейнера, а передняя, нагретая сильнее часть слитка под давлением сваривается с прессостатком и происходит его выпрессовывание. Далее процесс повторяется циклически.

На выходе из печи индукционного нагрева слитков, их температура измеряется выдвижной термопарой, а сам процесс нагрева контролируется системой управления. Время перезарядки слитка диаметром 175 мм и длиной 418 мм составляет 20 с. Выбранные параметры линии позволяют прессовать токопроводящие жилы сечением 70...240 кв.мм со скоростью 120 м/мин в один или два ручья. Линия имеет длину 29,15 м, ширину 11,4 м и высоту – 2,78 м. Ее масса составляет 66,7 т, а установленная мощность (без печи) – 515 кВт.

Цикл изготовления кабелей до 10 кВ включает в себя как изготовление кабелей с бумажной пропитанной изоляцией по традиционной технологии, так и изготовление кабелей с пластмассовой изоляцией на упомянутое напряжение. Новым является применение изоляции из силанольносшитого полиэтилена на основе как импортируемых, так и разработанных [1-4] компонент на напряжение до 10 кВ (с круглыми экранированными жилами) и на напряжение до 6 кВ с секторными жилами. Существенно улучшена пожаробезопасность кабелей за счет применения (в покровах) не распространяющих горение (нг) составов, и составов с низким газодымовыделением (нгд) [5, 6]. Здесь использована традиционная схема общей скрутки изолированных жил с помощью планетарной крутильной машины (МКРА). Такая схема при приемлемом диаметре вращающейся планетарной клетки, обеспечивающей открутку, позволяет разместить на ней максимум 3 барабана № 15, то есть диаметром 1500 мм, что в сочетании со вспомогательным устройством позволяет скручивать сердечник кабеля, состоящий максимум из четырех жил, сечением, как правило, не более 240...300 кв.мм для обеспечения заданных строительных длин кабелей.

Именно эта схема скрутки является главной причиной, которая не позволяет скручивать жилы сечением выше 300 кв.мм.

Для этого цикла изготовления характерными являются использование пластмассовой изоляции электрическим напряжением на проход в технологических линиях. В [19] были рассмотрены физические процессы, приводящие к транспорту электрических зарядов замкнутым слоем диэлектрика на проводящей подложке. В [20-22] приведены методики определения токов переноса и

основанные на этом критерии применения испытательных средств и испытаний изоляции высоким напряжением на проход в технологических экструзионных линиях.

Циклы изготовления кабелей 110 и 330 кВ. В этих циклах были применены новые принципы скрутки и наложения изоляции с помощью строенной экструзионной головки. Ниже рассматриваются основные особенности этих процессов с точки зрения их практической реализации.

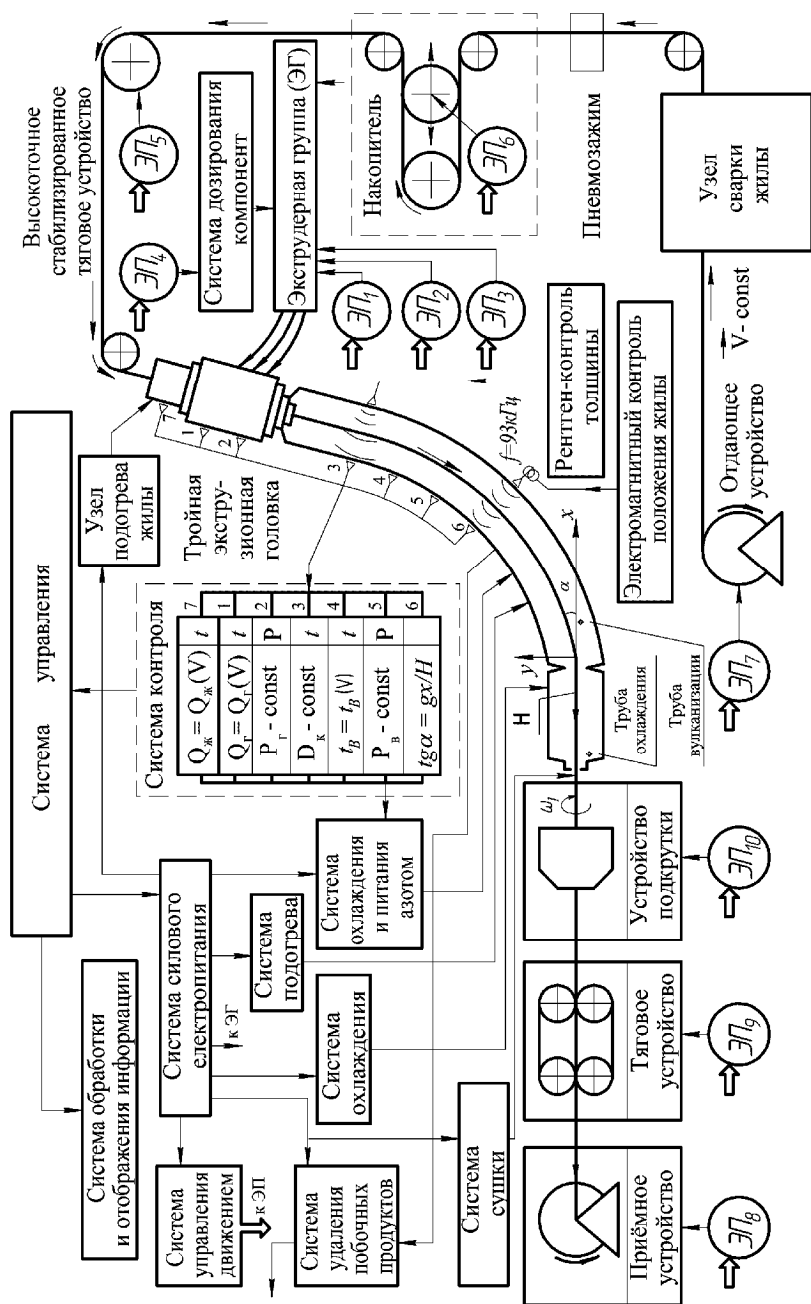


Рисунок 3 – Функциональная схема наклонной линии вулканизации

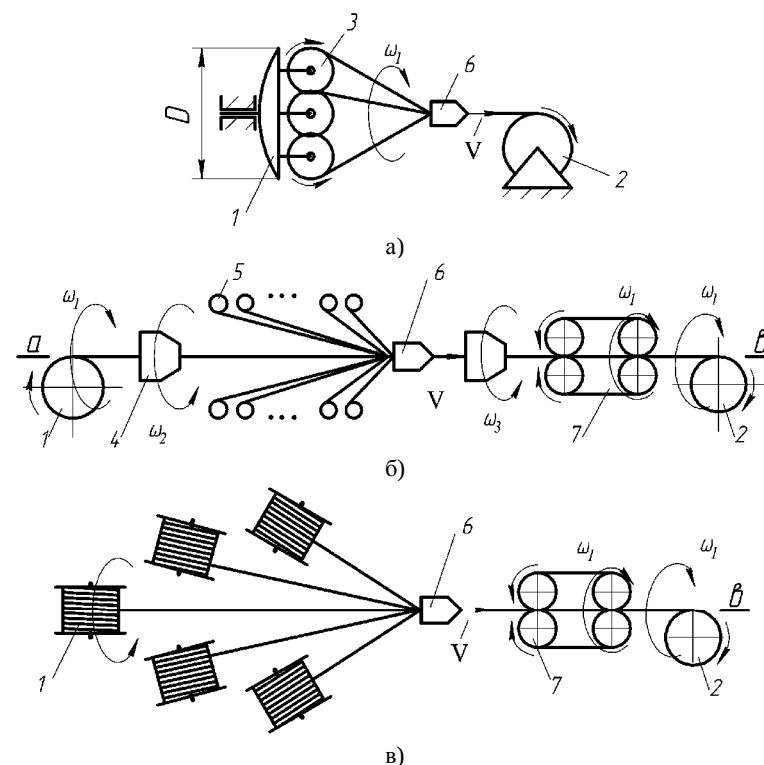


Рисунок 4 – Схемы скрутки: традиционная (а), с вращающимся тяговым устройством (б, в), при наложении проволочного экрана (б), общей скрутки жил (в)

Главной составной частью технологии изготовления кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 6...330 кВ является наклонная линия вулканизации полиэтилена в среде сжатого до 15 атм сухого азота (рис. 3). Основные закономерности работы такой линии приведены в [23]. В ней использован принцип наложения трехслойной изоляции строенной экструзионной головкой на свободно провисающую в вулканизационной трубе токопроводящую жилу. Постоянная провисания жилы составляет 130 м. При изменении сечения жилы усилие H в нижней точке обеспечивается регулируемым широтно-импульсным приводом тягового устройства. Устройство подкручивания жилы обеспечивает ее осевое кручение с шагом около 15 м и получение, за счет более эффективного охлаждения, корочки тонкого слоя застывшего полиэтилена на внешней поверхности изоляции, что препятствует ее стеканию вдоль жилы и возникновению эксцентриситета.

Схемы скрутки могут быть построены по различным принципам (рис. 4). Традиционный принцип скрутки (рис. 4, а) использует вращение отдаю-

щего устройства 1 (или клетки крутильной машины) с угловой скоростью ω_1 , а приемное устройство обеспечивает поступательную линейную скорость V . Соотношением ω и V определяется шаг скрутки готового изделия. Главный недостаток такой схемы – большой диаметр крутильной клетки D , который примерно втрое больше диаметра барабана 3 с наносимыми элементами скрутки (проволокой, готовыми изолированными жилами и т.п.). Так, например, при применении отдающих барабанов 3 диаметром всего 1,6 м в таких схемах диаметр клетки D уже составляет около 5 м. Диаметры кабелей на напряжение 110...330 кВ составляют 70 мм и более, что требует применение барабанов размером 2...3 или даже 3,6 м. Это обстоятельство делает практически невозможным применение традиционных схем общей скрутки жил или наложения проволочных элементов.

Поэтому, для изготовления кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена применен принцип вращения самого кабеля вокруг собственной оси с помощью вращающихся (вокруг этой же оси со скоростью ω_1) тягового, отдающего и приемного устройства (рис. 4, б, в) одновременно в одну сторону.

Этот принцип был использован при разработке схемы наложения проволочного экрана (рис. 4, б) и общей скрутки изолированных жил (рис. 4, в), или скрутки жил большого сечения (более 1000 кв.мм), состоящих из пяти предварительно скрученных и уплотненных секторных жил кабелей 6...330 кВ.

При наложении проволочного экрана схема скрутки работает так (рис. 4, б). Сердечник кабеля сходит с отдатчика 1 и проходит сквозь обмотчик для наложения методом обмотки полупроводящего водоблокирующего полотна. Проволоки, из которых состоит экран, сходят из неподвижных катушек 5, число которых может достигать 96 штук. Скрутка экрана происходит в калибре 6 за счет вращения сердечника кабеля вокруг собственной оси, что обеспечивается вращением отдающего устройства 1, приемного устройства 2 и тягового устройства 7 с угловой скоростью ω_1 . На экран из медных проволок в соответствии с разработанными техническими условиями Украины на такие кабели накладываются 2 медные ленты в противоположную наложению проволок сторону.

При общей скрутке жил (рис. 4, в) с неподвижных отдающих устройств 1 сходят 5 жил и скручиваются в калибре 6 за счет вращения тягового устройства 7 и приемного устройства 2 с угловой скоростью ω_1 вокруг оси кабеля. Кроме того, отдающие устройства могут вращаться в сторону, противоположную направлению общей скрутки и тем самым обеспечивать открутку круглых жил. При общей скрутке жил большого сечения из пяти секторов последние уже уложены на барабан с подкруткой и их открутка не производится.

Применение принципа скрутки за счет вращения самого кабеля вокруг собственной оси позволяет принципиально решить задачи разработки технологических схем наложения проволочного экрана, брони, проводящих и полупроводящих лент в экране для диаметров кабеля 70 мм и более при диаметрах

барабана приемного устройства до 3,6 м и общей высоте крутильной машины практически определяемой только этим габаритом. Реализовать такую технологическую схему при использовании традиционных схем скрутки с вращающимися клетями, например, при количестве отдающих катушек равном 96 (как это необходимо при наложении экрана) было бы практически невозможно. Следует отметить [24], что получение коэффициента заполнения сечения жилы металлом 0,75 и выше невозможно получить для круглых жил без их уплотнения.

Описанные выше схемы позволяют получать общий коэффициент заполнения не менее 0,85 даже для составных жил, скрученных из пяти предварительно уплотненных секторных жил. Это позволяет технологически решить вопросы изготовления жил крупных сечений (до 2000 кв.мм) для кабелей на напряжение до 330 кВ.

Применение этих принципов позволило разработать и реализовать впервые в СНГ и Украине промышленный выпуск кабелей с изоляцией из теплоустойчивого сшитого полиэтилена на напряжение 6...330 кВ [25-30].

Контроль качества готовой продукции (приемо-сдаточные испытания) включают в себя, прежде всего, проверку всех строительных длин переменным напряжением, для кабелей до 110 кВ – контроль уровня частичных разрядов (ЧР), а для кабелей напряжением свыше 150 кВ – дополнительно измерение угла диэлектрических потерь в изоляции, который может сильно изменяться в зависимости от удельной проводимости материала полупроводящих пластмассовых экранов по жиле и по изоляции [31]. Основные параметры и схемы испытательных установок с использованием принципа резонансного возбуждения колебательного контура приведены в [23, 32-35]. Как показали исследования, собственный уровень шумов установок для контроля уровня ЧР не превосходит 1 пКл.

В заключение остановимся на определении основных параметров индукционного нагрева слитков при изготовлении алюминиевых ТПЖ небольших сечений. Этот процесс является достаточно сложным и описывается решением уравнения Бесселя для проникновения поля в цилиндрический слиток. К тому же при нагреве изменяются сопротивления материала индуктора и слитка. Однако, учитывая, что индуктор охлаждается водой, можно считать его температуру постоянной так же, как и температуру слитка, и равной, примерно, 400 °С. При этих допущениях получим оценку параметров сверху. Приняв такое условие стационарности, положим далее, что индуктор и слиток представляют вместе короткозамкнутый воздушный трансформатор, в котором одновитковая вторичная обмотка является полым цилиндром и имеет толщину, равную глубине проникновения поля Δ в материалах слитка. Тогда к данной модели можно применить ту же теорию, которая разработана для случая короткого замыкания во вторичной обмотке трансформатора.

В режиме короткого замыкания индуктивность рассеяния обоих обмоток будет равной [36]

$$L = \mu_0 n_1 \delta (Ck/h), \quad (1)$$

где μ_0 – магнитная постоянная вакуума; n_1 – количество витков первичной обмотки; C – средняя длина витка обеих обмоток; k – коэффициент приведения высоты обмотки к расчетной длине линий поля рассеяния (принимается равным 0,95); h – высота первичной обмотки; δ – приведенная ширина зазора между обмотками.

Средняя длина витка обеих обмоток C и приведенная ширина зазора δ между обмотками соответственно равны

$$C = (C_1 + C_2)/2; \quad (2)$$

$$\delta = \delta_{12} + (b_1 + b_2)/3, \quad (3)$$

где $C_1 = \pi D_1$, $C_2 = \pi D_2$ – соответственно средняя длина витка первичной и вторичной обмоток, имеющих средние диаметры D_1 и D_2 ; δ_{12} – действительное значение зазора между обмотками 1 и 2; b_1 , b_2 – толщина первичной и вторичной обмоток соответственно.

Здесь значение b_2 следует принять равным глубине Δ проникновения поля в нагреваемый слиток.

Тогда, потребляемый первичной обмоткой комплексный ток будет равен

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{R + j\omega L}, \quad (4)$$

где ω – угловая частота напряжения; $\dot{U}$ – комплексное напряжение первичной обмотки; $R = R_1 + R'_2$ – общее активное сопротивление; R_1 – активное сопротивление первичной обмотки; R'_2 – активное сопротивление вторичной обмотки, приведенное к первичной; j – мнимая единица.

Действительное значение R_2 определяется через глубину проникновения поля в материал слитка, как

$$R_2 = r \frac{2\rho(D_C - \Delta/2)}{h \cdot \Delta}, \quad (5)$$

где ρ – удельное сопротивление материала слитка; D_C – диаметр слитка.

Учитывая то, что при градиентном нагреве применяется переключение витков первичной обмотки, под h следует понимать суммарную высоту всех витков, включенных последовательно.

Глубина проникновения поля

$$\Delta \sqrt{2r/(wm)} \quad (6)$$

в материал слитка определяется в данном случае только его проводимостью и угловой частотой напряжения.

Используя теперь (1)...(6) можно определить величину тока, косинус угла нагрузки и мощность, выделяемую в слитке в первом приближении, принимая процесс адиабатическим за время нагрева слитка, и считая начальное удельное сопротивление его материала равным ($\rho = 28,2 \cdot 10^{-9}$ Ом · м)

Как показывают расчеты, такой короткозамкнутый трансформатор имеет косинус угла φ нагрузки около 0,9 и для компенсации индуктивной составляющей следует применять батареи косинусных конденсаторов, с помощью которых всегда можно добиться $\cos \varphi$ примерно равного единице.

Выводы. Предложены технологические схемы и принципы построения современных электротехнологических комплексов производства в Украине, позволяющие решить проблему промышленного выпуска в Украине современных силовых кабелей энергетического назначения напряжением до 330 кВ.

Список литературы: 1. Патент на винахід № 83826, Україна, МПК С 08L 83/04. Здатна до зшивання композиція / *Василець Л.Г., Золотарьов В.М., Карпушенко В.П.* та ін.; заявник та патентовласник ЗАТ завод «Південкабель», заявл. 01.11.2005, опубл. 26.08.2008, Бюл. № 16. 2. Патент на винахід № 83827, Україна, МПК С 08L 83/04. Здатна до зшивання композиція / *Василець Л.Г., Золотарьов В.М., Карпушенко В.П.* та ін.; заявник та патентовласник ЗАТ завод «Південкабель», заявл. 01.11.2005, опубл. 26.08.2008, Бюл. № 16. 3. Патент на винахід № 83828, Україна, МПК С 08L 83/04. Здатна до зшивання композиція / *Василець Л.Г., Золотарьов В.М., Карпушенко В.П.* та ін.; заявник та патентовласник ЗАТ завод «Південкабель», заявл. 01.11.2005, опубл. 26.08.2008, Бюл. № 16. 4. Патент на винахід № 84D12, Україна, МПК С 08L 83/04. Здатна до зшивання композиція / *Василець Л.Г., Золотарьов В.М., Карпушенко В.П.* та ін.; заявник та патентовласник ЗАТ завод «Південкабель», заявл. 01.11.2005, опубл. 10.09.2008, Бюл. № 17. 5. Патент на винахід № 85909, Україна, МПК H01 В 9/00. Кабель силовий / *Золотарьов В.М.* та ін.; заявник та патентовласник ЗАТ завод «Південкабель», заявл. 23.05.2007, опубл. 25.11.2008, Бюл. № 22. 6. Патент на винахід № 85912, Україна, МПК H01 В 9/00. Кабель силовий вогнестійкий / *Золотарьов В.М.* та ін.; заявник та патентовласник ЗАТ завод «Південкабель», заявл. 23.05.2007, опубл. 10.03.2009, Бюл. № 5. 7. *Василець Л.Г., Золотарев В.М., Карпушенко В.П., Ганьшина Л.В., Чулеева Е.В.* Получение и свойства пространственно-структурированных полиолефинов для кабельных композиций // Труды 25-й междунауч. конф. «Композиционные материалы в промышленности». – Ялта. – 2005. – С. 269-272. 8. *Щебенюк Л.А., Золотарев В.М., Гурич А.Г., Голик О.В.* Исследование корреляции электрических и механических параметров двойной изоляции эмальпроводов // Электротехника и электромеханика, № 2. – 2005. 9. *Золотарьов В.М., Карпушенко В.П., Василець Л.Г., Тулєєва О.В.* Надійшли кабельно-провідникової продукції. Методи підтвердження на основі експериментальних досліджень // Вісник НТУ «ХПІ». – № 34. – 2006. – С. 3-17. 10. *Золотарев В.М., Карпушенко В.П., Науменко А.А.* Определение усилия волочения фасонных токопроводящих жил // Труды 5-й междунауч. конф. «Электрические материалы и компоненты». – М.: МЭИ. – 2004. – С. 152-153. 11. *Золотарев В.М., Бузько С.В., Карпушенко В.П., Науменко А.А.* Приближенные соотношения для определения предельных обжатий при волочении круглых медных и алюминиевых профилей для жил кабелей и проводов // Междунауч. техн. сборник «Резание и инструмент в технологических системах». – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2004. – Вып. 67. – С. 206-207. 12. *Золотарев В.М., Бузько С.В., Карпушенко В.П., Науменко А.А.* Понятие геометрического фактора волочения инструмента и его использование в практических вычислениях // Труды 9-й Международной научно-технической конференции «Физические и компьютерные технологии». – Харьковская научно-производственная корпорация «ФЭД». – 2004. – С. 94-96. 13. *Золотарев В.М., Карпушенко В.П., Науменко А.А., Бузько С.В.* Методика определения допустимых обжатий на первом переходе при волочении круглой проволоки электротехнического назначения из меди и алюминия // Вестник НТУ «ХПИ» «Технологии в машиностроении». – 2005. – Вып. 12. – С. 92-95. 14. *Золотарев В.М., Карпушенко В.П., Науменко А.А., Бузько С.В.* Исследование допустимых обжатий на первом переходе при волочении круглой проволоки электротехнического назначения из меди и алюминия // Материалы 3-й международной научно-технической конференции «Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации». Ч. 1. – Курск: Курский ГТУ. – 2005. – С. 152-156. 15. *Золотарев В.М., Карпушенко В.П., Науменко А.А., Бузько С.В.* Определение силовых параметров при волочении токопроводящих жил силовых кабелей // Вестник НТУ «ХПИ» «Технологии в машиностроении». – 2006. – Вып. 28. –

С. 67-71. **16.** Золотарев В.М. Оценка электрической напряженности токопроводящей жилы в ионизированном газе // Труды 12-й международной научно-технической конференции «Физические и компьютерные технологии». Харьков: ХНПК «ФЭД», 2006. – С. 241-245. **17.** Золотарев В.М., Карпушенко В.П., Бузько С.В. Моделирование переходов при волочении фасонных профилей // Вестник НТУ «ХПИ». – 2006. – Вып. 7. – С. 6-11. **18.** Науменко А.А., Золотарев В.М. Метод определения диагональных элементов матриц, соответствующих ядрам интегральных уравнений. Фредгольма для расчета плоскопараллельных безвихревых полей различной физической природы // Вестник НТУ «ХПИ». – № 37. – 2006. – С. 149-155. **19.** Золотарев В.М., Карпушенко В.П., Науменко А.А., Бузько С.В. Определение силовых параметров волочения в условиях кабельного предприятия // Труды 11-й международной конференции ICEEE, ч. 1. – М.: Технический университет «МЭИ». – С. 52-54. **20.** Золотарев В.М. и др. Диэлектрические потери в движущейся кабельной изоляции // Труды 11-й межд.конф. ICEEE. – М.:МЭП. – 2006, 4.1. – С. 54-55. **21.** Золотарев В.М., Карпушенко В.П., Науменко А.А., Бузько С.В. Математическая модель электрической напряженности изолированных жил силовых кабелей // Труды 12-й межд.научно-техн.конф. «Физические и компьютерные технологии». – Харьков: ХНПК «ФЭД», 2006. – С. 239-240. **22.** Золотарев В.М., Карпушенко В.П., Науменко А.А., Золотарев В.В. Физические процессы, приводящие к транспорту электрических зарядов слоем диэлектрика на проводящей подложке // Вестник НТУ «ХПИ». – 2005. – Вып. 42. – С. 3-15. **23.** Золотарев В.В., Карпушенко В.П., Науменко О.А., Золотарев В.М. Основні закономірності роботи похилої екструзійної лінії для виготовлення силових кабелів на напругу до 330 кВ та їх заводських випробувань // Вісник НТУ «ХПИ». – 2008. – № 44. – С. 44-52. **24.** Золотарев В.М., Карпушенко В.П., Науменко А.А. Предельные значения коэффициента заполнения для скрученных круглых уплотненных жил кабелей, проводов и шнуров // Труды межд.симпозиума ЭЛМАШ-2006 «Перспективы и тенденции развития электротехнического оборудования». Т. 2. – М.: Интерэлектромаш. – 2006. – С. 190-192. **25.** Золотарев В.М., Антоненко Ю.А., Золотарев В.В. Самонесущие изолированные провода: особенности конструкции и перспективы развития производства в Украине // Вестник НТУ «ХПИ». – 2006. – Вып. 34. – С. 12-17. **26.** Золотарев В.М., Обозный А.Л. Новые отечественные разработки в области силовых кабелей // Вестник НТУ «ХПИ». – 2006. – Вып. 34. – С. 129-132. **27.** Карпушенко В.П., Золотарев В.М., Науменко А.А., Золотарев В.В. Отечественные разработки кабелей среднего, высокого и сверхвысокого напряжений // Вестник НТУ «ХПИ». – 2007. – № 20. – С. 87-95. **28.** Патент на винахід № 60284, Україна, МПК 7 H01 B9/02. Кабель силовий пожежобезпечний (Золотарев В.М. та ін.; заявник та патентовласник ЗАТ завод «Південкабель», заявл. 30.07.03, опубл. 26.05.08, Бюл. № 10. **29.** Патент на винахід № 60285, Україна, МПК 7 H01 B9/02. Кабель силовий пожежобезпечний (Золотарев В.М. та ін.; заявник та патентовласник ЗАТ завод «Південкабель», заявл. 30.07.03, опубл. 10.12.08, Бюл. № 23. **30.** Патент на винахід № 60266, Україна, МПК 7 H01 B9/02. Кабель силовий екранований і водозахищений (Золотарев В.М. та ін.; заявник та патентовласник ЗАТ завод «Південкабель», заявл. 30.07.03, опубл. 10.01.08, Бюл. № 1. **31.** Золотарев В.В., Карпушенко В.П., Золотарев В.М., Науменко А.А. Распределение стационарного электрического поля в цилиндрическом неидеальном диэлектрике // Электротехника и электромеханика. – 2008. – № 4. – С. 65-69. **32.** Набока Б.Г., Лактионов С.В., Золотарев В.М., Антоненко Ю.А., Карпушенко В.П. Поле концевой муфты для подключения кабеля к установке измерения ЧР // Вестник НТУ «ХПИ». – 2006. – Вып. 34. – С. 60-66. **33.** Набора Б.Г., Гурич А.Г., Золотарев В.М., Нечаус А.А. Обоснование допустимых режимов эксплуатации резонансных установок для диагностики кабелей // Вестник НТУ «ХПИ». – 2005. – № 42. – С. 86-93. **34.** Золотарев В.М., Карпушенко В.П., Кривенко А.Ф., Золотарев В.В., Науменко А.А. Энергосберегающие схемы испытаний кабелей с полиэтиленовой изоляцией // Вестник НТУ «ХПИ». – 2008. – № 21. – С. 55-66. **35.** Золотарев В.М., Обозный Л.А. Перспективы развития силовых кабелей в электроэнергетике Украины // Энергетика та електрифікація. – 2007. – № 9. – С. 33-36. **36.** Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. Ч. 1. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1958. – 464 с.

Поступила в редколлегию 11.08.2009

УДК 621.373

Н.Н.ИГНАТЕНКО, канд.техн.наук, зав.сектором, НТУ «ХПИ»

ВЫБОР ДЛИНЫ ВОЗДУШНЫХ ПРОМЕЖУТКОВ РАЗРЯДНИКОВ ЗАМЫКАТЕЛЕЙ НАГРУЗКИ В КРОУБАР- ГЕНЕРАТОРАХ ИМПУЛЬСНОГО ТОКА МОЛНИИ

Запропоновано метод розрахунку в високоефективних генераторах великих імпульсних струмів блискавки (ГВІСБ) довжини робочих проміжків некерованих повітряних стержневих розрядників замикачів RL-навантаження. Показано, що спрацювання вказаних некерованих розрядників кроубар-замикачів відбувається в момент часу, близький до моменту досягнення струмом в RL-навантаженні свого максимального значення. При цьому у навантаженні формується імпульс струму блискавки, амплітудно-часові параметри (АЧП) якого відповідають вимогам ГОСТ 30585-98.

Method of calculation of length of working gaps of uncontrolled air rod dischargers of RL-load closers in high-efficiency generators of high pulsed currents of lightning (GNPCL) has been proposed. It was shown that operation of above-mentioned uncontrolled dischargers of crowbar-closers occurs in the moment of time which is close to the moment when the current in RL-load reaches its maximal value. During this, lightning current pulse is formed in the load that (pulse) has amplitude-time parameters (ATP) that conform to the requirements of All-Union state standard GOST 30585-98.

Введение. Для получения больших импульсных аperiodических токов в ТВН достаточно часто применяются генераторы с использованием кроубар-замыкателей нагрузки [1]. В разрядной цепи таких классических генераторов применяют управляемые вакуумные разрядники замыкателей RL-нагрузки, которые, благодаря использованию мощных генераторов поджигающих импульсов (ГВПИ), срабатывают в момент достижения током в нагрузке своего максимального значения [2]. Разработанные в последнее время генераторы больших импульсных токов молнии (ГБИТМ) содержат рационально выбранные корректирующие емкости $C_{к1} = C_{к2}$, два замыкателя нагрузки с неуправляемыми воздушными (атмосферного давления) стержневыми разрядниками замыкателями RL-нагрузки. Указанные генераторы тока молнии позволяют отказаться от применения мощных ГВПИ и достаточно стабильно работают при рабочих напряжениях емкостных накопителей энергии (ЕНЭ) до напряжений 1,9 МВ [3-5]. К основным трудностям, возникающим при проектировании и эксплуатации высоковольтных генераторов ГБИТМ, следует отнести рациональный выбор длины воздушных промежутков неуправляемых воздушных разрядников кроубар-замыкателей нагрузки. Необходимо отметить, что для достижения высокого коэффициента полезного действия (КПД) генератора указанные разрядники кроубар-замыкателей должны срабатывать в момент времени, близкий к моменту достижения током в нагрузке ГБИТМ своего максимального значения.

Таким образом, **цель работы** состоит в рациональном выборе длины воздушных зазоров неуправляемых стержневых разрядников кроубар-

замыкателей нагрузки для всего диапазона рабочих напряжений ГБИТМ.

Материалы и результаты исследований. Схема замещения разработанного генератора ГБИТМ с применением неуправляемых воздушных стержневых разрядников замыкателей нагрузки приведена на рис. 1. При срабатывании разрядника P_1 ЕНЭ разряжается на нагрузку и цепи замыкателей нагрузки. При этом форму напряжения $u_p(t)$, действующего на разрядники P_2 и P_3 до момента их электрического пробоя, можно представить в виде:

$$u_p(t) = B_1 U_0 \cos(a_1 t) - B_2 U_0 \cos(b_1 t), \quad (1)$$

где

$$B_1 = \frac{L_n L_{k1} (c_1^2 - a_1^2) \cdot (2L_n + L_{31} + L_{k1})^{-1}}{\left[L_r + \frac{L_n \cdot (L_{31} + L_{k1})}{2L_n + L_{31} + L_{k1}} \right] (b_1^2 - a_1^2)}; \quad B_2 = \frac{L_n L_{k1} \cdot (c_1^2 - b_1^2) \cdot (2L_n + L_{31} + L_{k1})^{-1}}{\left[L_r + \frac{L_n \cdot (L_{31} + L_{k1})}{2L_n + L_{31} + L_{k1}} \right] (b_1^2 - a_1^2)};$$

a_1, b_1 – собственные круговые частоты колебаний в ГБИТМ [6]; U_0 – рабочее напряжение ЕНЭ в исследуемом генераторе тока молнии.

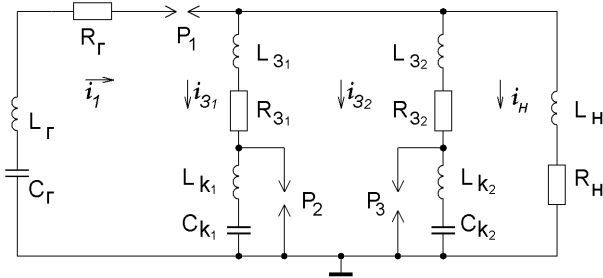


Рисунок 1 – Схема замещения генератора ГБИТМ с двумя замыкателями нагрузки и двумя корректирующими емкостями

Для определения длины воздушных промежутков неуправляемых разрядников P_2 и P_3 замыкателей нагрузки в ГБИТМ (рис. 1) воспользуемся методом «равных площадей» [7,8]. Указанный метод позволяет определить площади $A_{2n} = A_{3n}$ вольт-секундных характеристик (ВСХ) напряжения $u_p(t)$ при электрическом пробое рабочих зазоров воздушных неуправляемых разрядников P_2 и P_3 замыкателей RL-нагрузки в ГБИТМ. Выражение для определения площадей ВСХ представим в следующем виде [7, 8]:

$$A_{2n} = A_{3n} = \int_{t_1}^{t_c} [u_p(t) - U_1] dt, \quad (2)$$

где U_1 – амплитуда импульсного напряжения $u_p(t)$, при которой в воздушных зазорах неуправляемых стержневых разрядников P_2 и P_3 замыкателей RL-нагрузки ГБИТМ появляются эффективные электроны, вызывающие начало развития стримера; t_1 – время, соответствующее амплитудному значению

напряжения U_1 ; t_c – время, при котором происходит резкий спад (срез) импульсного напряжения $u_p(t)$.

В [7] было показано, что величину U_1 можно определить как амплитудное значение напряжения пробоя стержневых разрядных промежутков длиной $S_{2n} = S_{3n}$ при воздействии на них постоянного напряжения или напряжения промышленной частоты. Амплитуду напряжения пробоя U_1 стержневых разрядников P_2 и P_3 в ГБИТМ при воздействии напряжения промышленной частоты находим из приближенного соотношения [9]:

$$U_1 \approx 5 + \kappa_E^{-1} S_{2n}, \quad (3)$$

где U_1 – амплитуда напряжения пробоя, кВ; $S_{2n} = S_{3n}$ – длина воздушных стержневых промежутков, см; $\kappa_E = 0,19$ см/кВ.

Используя выражения (1) и (3), запишем приближенное соотношение для определения времени t_1 , при котором в воздушных зазорах разрядников P_2 и P_3 замыкателей нагрузки ГБИТМ появляется эффективные электроны:

$$t_1 \approx \sqrt{\frac{2(U_1 \cdot U_0^{-1} - B_1 + B_2)}{B_2 b_1^2 - B_1 a_1^2}}. \quad (4)$$

Графический анализ расчетных и экспериментальных кривых напряжения $u_p(t)$, полученных при срабатывании неуправляемых воздушных стержневых разрядников P_2 и P_3 замыкателей RL-нагрузки в ГБИТМ (рис. 1), показывает, что с увеличением рабочего напряжения ЕНЭ U_0 растет амплитуда напряжения U_1 . При этом отношение амплитудных значений U_1/U_0 практически не изменяется, а время t_1 , согласно (3), изменяется настолько незначительно, что его изменением можно пренебречь. Приведенное выше утверждение и анализ выражения (4) позволяет заключить, что время t_1 появления эффективных электронов в воздушных разрядных промежутках разрядников P_2 и P_3 ГБИТМ может быть принято постоянным. Численные значения времени t_1 можно определить с помощью графического анализа экспериментальных кривых для импульсного напряжения $u_p(t)$, полученных при срабатывании разрядников P_2 и P_3 в ГБИТМ (рис. 1), или применив выражение (4).

Если длины разрядных промежутков неуправляемых воздушных разрядников P_2 и P_3 замыкателей RL-нагрузки в ГБИТМ выбраны таким образом, что при изменении рабочего напряжения U_0 в ЕНЭ время среза t_c не изменяется, а момент времени t_1 остается постоянным, то для электродной системы «стержень-стержень» можно записать следующее соотношение [8]:

$$\frac{A_{21}}{S_{21}} = \frac{A_{22}}{S_{22}} = K = \frac{A_{2n}}{S_{2n}} = \text{const}, \quad (5)$$

где $A_{21} = A_{31}, A_{22} = A_{32}, \dots, A_{2n} = A_{3n}$ – площади ВСХ, соответствующие амплитуде напряжения $u_p(t)$ и длинам $S_{21} = S_{31}, S_{22} = S_{32}, \dots, S_{2n} = S_{3n}$ воздушных промежутков неуправляемых стержневых разрядников P_2 и P_3 замыкателей нагрузки.

Используя (2), представим приближенное соотношение для определения

площадей ВСХ напряжения $u_p(t)$ в виде:

$$A_{2n} = A_{3n} \approx U_0 \left[\frac{B_1}{a_1} (\sin a_1 t_c - \sin a_1 t_1) - \frac{B_2}{b_1} (\sin b_1 t_c - \sin b_1 t_1) \right] - \Delta t (5 + \kappa_E^{-1} S_{2n}), \quad (6)$$

где $\Delta t = t_c - t_1$.

На основании (5) и (6) запишем выражение для определения длины $S_{2n} = S_{3n}$ разрядных промежутков неуправляемых воздушных разрядников P_2 и P_3 замыкателей RL-нагрузки в ГБИТМ (рис.1) в следующем виде:

$$S_{2n} = S_{3n} \approx \frac{U_0 S_{21} \left[\frac{B_1}{a_1} (\sin a_1 t_c - \sin a_1 t_1) - \frac{B_2}{b_1} (\sin b_1 t_c - \sin b_1 t_1) \right] - 5 \Delta t S_{21}}{A_{21} + \kappa_E^{-1} \Delta t S_{21}}. \quad (7)$$

Проведем расчет длины разрядных промежутков неуправляемых воздушных стержневых разрядников P_2 и P_3 в ГБИТМ (рис. 1), в состав которого входит генератор импульсных напряжений ГИН-3. Зная электрические параметры схемы замещения исследуемого генератора токов молнии, определим значения круговых частот и коэффициентов B_1 и B_2 [6]. При указанных электрических параметрах рассматриваемого ГБИТМ круговые частоты имеют значения $a_1 = 0,4927 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$ и $b_1 = 1,2962 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$, а коэффициенты в выражении (1) будут соответственно равны: $B_1 = 0,31$ и $B_2 = 0,26$. Задав значения $U_0 = 700 \text{ кВ}$ и $t_1 = 0,85 \text{ мкс}$ из соотношения (4), находим амплитуду напряжения U_1 , которая в данном случае будет приблизительно равна $U_1 \approx 125 \text{ кВ}$. Используя (3), находим, что длина разрядных промежутков $S_{21} = S_{31}$ будет приблизительно равна $S_{21} = S_{31} = 22,86 \text{ см}$. Положив время среза t_c равным $t_c \approx 3,7 \text{ мкс}$, из выражения (7) определим длину разрядных промежутков $S_{22} = S_{32}$ в ГБИТМ при рабочем напряжении ГИН-3 равном $U_0 = 750 \text{ кВ}$. Согласно полученным расчетным данным длины разрядных промежутков в этом случае будет равна $S_{22} = S_{32} \approx 24,45 \text{ см}$. При этом численное значение площади ВСХ будет приблизительно равно $A_{22} = A_{31} \approx 167,27 \text{ кВ} \cdot \text{мкс}$. Отношение площади ВСХ к длине $S_{22} = S_{32} = 24,45 \text{ см}$ воздушных разрядных промежутков разрядников кроубар-замыкателей составит величину, приблизительно равную $A_{21}/S_{21} = A_{31}/S_{31} \approx 6,84 \text{ кВ} \cdot \text{мкс/см}$, что хорошо согласуется с данными, приведенными в [8].

Для проверки полученных расчетных данных на экспериментальной базе НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» были проведены соответствующие высоковольтные исследования. В состав экспериментального генератора ГБИТМ входили: ГИН-3 ($C_2 \approx 0,08 \text{ мкФ}$, $L_H \approx 35 \text{ мкГн}$, $R_2 \approx 2 \text{ Ом}$), два замыкателя нагрузки с двумя корректирующими емкостями ($R_{31} \approx R_{32} \approx 0,1 \text{ Ом}$; $L_{31} \approx L_{32} \approx 5 \text{ мкГн}$; $L_{K1} \approx L_{K2} \approx 5 \text{ мкГн}$; $C_{K1} \approx C_{K2} \approx 20,83 \text{ нФ}$) и RL-нагрузка ($R_H \approx 0,1 \text{ Ом}$, $L_H \approx 14 \text{ мкГн}$). На рис. 2 приведена экспериментальная кривая напряжения $u_p(t)$, измеренного на разрядниках замыкателей нагрузки P_2 и P_3 в ГБИТМ. Согласно рис. 2 при рабочем напряжении $U_0 = 750 \text{ кВ}$ импульсное напряжение $u_p(t)$ достигает своего амплитудного значения $U_{pm} = 270 \text{ кВ}$ при $t_{pm} \approx 2 \text{ мкс}$. При этом

неуправляемые воздушные стержневые разрядники замыкателей нагрузки P_2 и P_3 генератора тока молнии работали стабильно и имели длину рабочих зазоров $S_{22} = S_{32} = 24,5 \text{ см}$.

Задавая значение рабочего напряжения U_0 генератора ГИН-3, с помощью (7) проведем расчет длины разрядных промежутков неуправляемых воздушных стержневых разрядников P_2 и P_3 замыкателей нагрузки в исследуемом генераторе. Полученные результаты расчетов и экспериментальные значения длины промежутков $S_{2n} = S_{3n}$, представим в таблице. Сравнение показывает, что результаты расчета и эксперимента хорошо совпадают. Это позволяет применять приведенные расчетные соотношения при проектировании и эксплуатации мощных генераторов ГБИТМ мегавольтного диапазона.

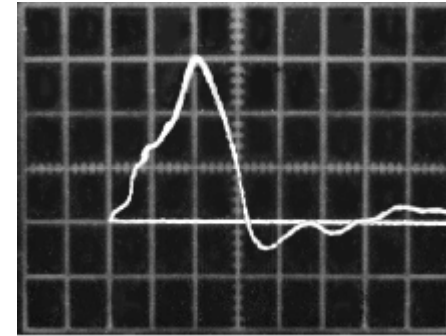


Рисунок 2 – Экспериментальная кривая напряжения $u_p(t)$ при срабатывании в ГБИТМ неуправляемых воздушных стержневых разрядников P_2 и P_3 замыкателей нагрузки ГБИТМ (масштаб по амплитуде – 90 кВ/дел ; масштаб по времени – 1 мкс/дел ; $K_{дел} = 18000$)

Таблица 1 – Расчетная и экспериментальная длина разрядных промежутков разрядников P_2 и P_3 замыкателей RL-нагрузки в генераторе ГБИТМ

Рабочее напряжение ГИН-3 U_0 , кВ	Расчетная длина промежутков $S_{2n} = S_{3n}$, см	Экспериментальная длина промежутков $S_{2n} = S_{3n}$, см	Ток в RL-нагрузке $I_{нт}$, кА
750	24,45	24,5	37
1000	32,94	33	50
1300	42,93	43,5	65
1600	52,97	54	80
1900	63,1	64	94

Выводы. Теоретически и экспериментально установлено, что в разработанных генераторах ГБИТМ могут быть применены неуправляемые воздушные стержневые разрядники замыкателей RL-нагрузки. При этом длины разрядных промежутков разрядников кроубар-замыкателей в ГБИТМ имеют линейную

зависимость от амплитудного значения импульсного напряжения $u_p(t)$ и рабочего напряжения U_0 генератора. Показано, что приведенные расчетные соотношения можно применять при практических разработках мощных высоковольтных генераторов тока молнии и эксплуатации существующих ГБИТМ.

Список литературы: 1. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. – М.: Мир, 1972. – 391 с. 2. Техника больших импульсных токов и магнитных полей / Под ред. В.С.Комелькова. – М.: Атомиздат, 1970. – 472 с. 3. Патент України №6279, МКІ НОЗКЗ/53. Генератор імпульсних струмів // Баранов М.І., Ігнатенко М.М., Колобовський А.К. – Опубл. Бюл. № 5, 16.05.2005. – 4 с. 4. Патент України №15714, МКІ НОЗКЗ/53. Генератор великих імпульсних струмів блискавки // Баранов М.І., Ігнатенко М.М. – Опубл. Бюл. № 7, 17.07.2006. – 4 с. 5. Баранов М.І., Ігнатенко Н.Н. Повышение энергетической эффективности разрядных цепей генераторов больших импульсных токов с мощными емкостными накопителями энергии // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка та електрофізика високих напруг. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2009. – № 49. – С. 3-14. 6. Ігнатенко Н.Н. Расчет переходных процессов в генераторах тока молнии с замыкателями нагрузки // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка та електрофізика високих напруг. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2009. – № 11. – С. 38-45. 7. Кремнев В.В., Месяц Г.А. Методы умножения и трансформации импульсов в сильноточной электронике. – Новосибирск: Наука, 1987. – 226 с. 8. Техника высоких напряжений: теоретические и практические основы применения: Пер. с нем. / М.Бейер, В.Бек, К.Меллер, В.Цаенгель; Под ред. В.П.Ларионова. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 555 с. 9. Техника высоких напряжений / Под ред. Л.И.Сиротинского. Часть первая – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1951. – 292с.

Поступила в редколлегию 08.09.2009

УДК 621.316.9

С.В.КИПРИЧ, млад.науч.сотр., НТУ «ХПИ»;
Г.М.КОЛИУШКО, канд.техн.наук, ст.науч.сотр., НТУ «ХПИ»;
Д.Г.КОЛИУШКО, канд.техн.наук, ст.науч.сотр., НТУ «ХПИ»;
А.А.ПЕТКОВ, канд.техн.наук, ст.науч.сотр., НТУ «ХПИ»

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА КОНЦЕВЫХ ТОЧЕК ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ЗОНЫ ЗАЩИТЫ ДВОЙНОГО РАЗНОВЫСОКОГО СТЕРЖНЕВОГО МОЛНИЕОТВОДА

У роботі наведено математичну модель розрахунку зони захисту подвійного різновисокого стрижневого блискавководу. Показана ефективність методики кінцевих точок на прикладі зони захисту подвійного різновисокого стрижневого блискавководу за допомогою Visual Basic for Applications.

The mathematical model of the two different height lightning-rods protection zone calculation is represented in this paper. Efficiency of the ending points method is shown by example of the two different height lightning-rods protection zone with used of the Visual Basic for Applications.

Постановка проблемы. В настоящее время в связи с возросшей грозовой

активностью актуальной является задача обеспечения молниезащищенности различных объектов как промышленного, так и бытового назначения. Рост стоимости оборудования, а также его низкая помехозащищенность, связанная с применением микропроцессорной техники, еще более обостряют проблему надежной защиты объектов от поражения молнией. Для решения задачи молниезащищенности применяются различные виды молниеотводов и их сочетания. Одним из часто используемых типов молниеотводов является двойной разноразный стержневой молниеотвод (ДРМ), который широко применяется при защите объектов электроэнергетики и промышленности: электрических подстанциях различного класса напряжения, атомных электростанциях, нефтеперекачивающих станциях и т.д. Изменение в Украине нормативной базы и тенденция к компьютеризации процесса проектирования молниезащиты вызывают необходимость дальнейших разработок по расчету зон защиты ДРМ.

Анализ публикаций. В Украине до 2009 года основным нормативным документом, который регламентировал методику построения зон защиты большинства встречающихся на практике типов молниеотводов, являлся [1] (далее – РД). Согласно ему два стержневых молниеотвода разной высоты, но не превышающей 150 м, образуют зону защиты, представленную на рис. 1, которая состоит из торцевых областей, ограниченных коническими поверхностями и внутренней области со сложным рельефом поверхности. Причем габаритные размеры торцевых областей зоны защиты определяются по соотношениям для одиночных стержневых молниеотводов, а габаритные размеры ее внутренней области определяются по формулам:

$$R_C = (R_{01} + R_{02})/2; \quad (1)$$

$$h_C = (h_{C1} + h_{C2})/2; \quad (2)$$

$$R_{CH} = R_C \frac{h_C - h_A}{h_C}. \quad (3)$$

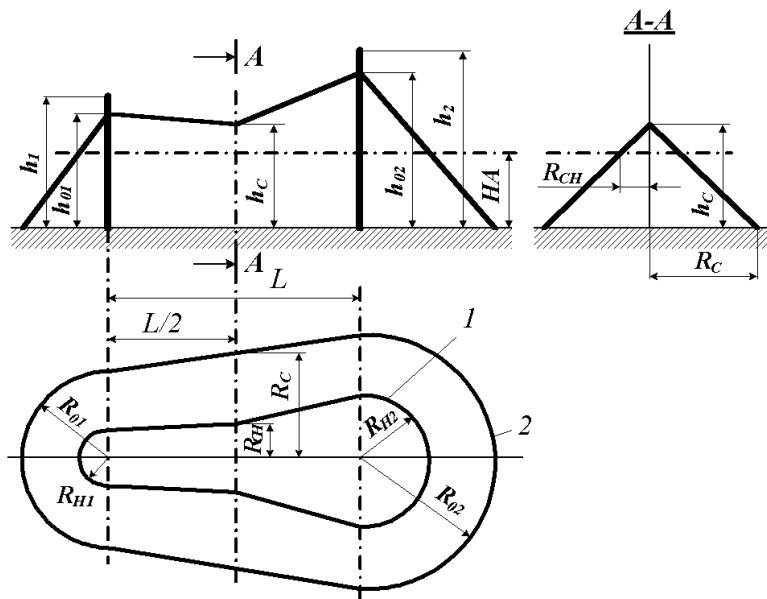


Рисунок 1 – Зона защиты двух стержневых молниеотводов разной высоты, согласно РД

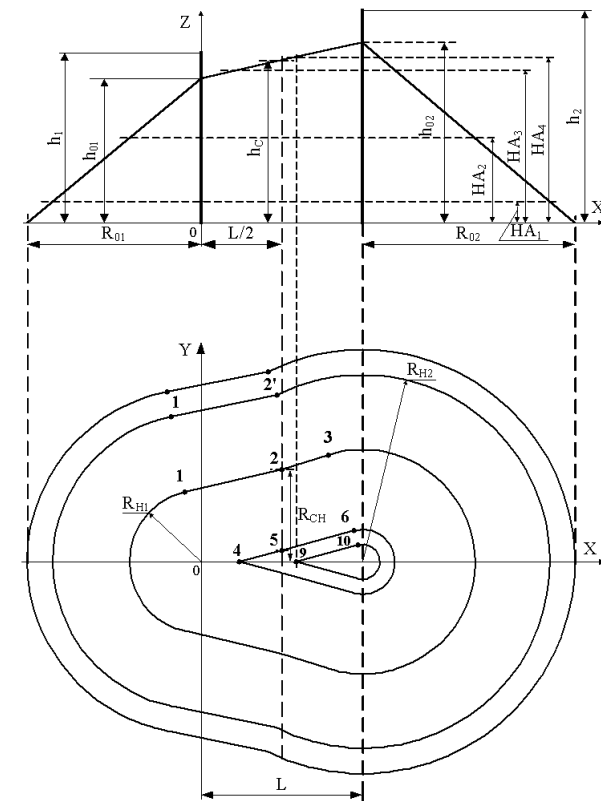


Рисунок 2 – Зона защиты ДРМ и ее границы на характерных высотах анализа для надежности защиты 0,995 при $h_1 < h_2$, $h_{01} < h_C < h_{02}$ и $R_C \leq \sqrt{R_{02}^2 - L^2/4}$;

h_1 и h_2 – высоты молниеотводов; L – расстояние между молниеотводами; h_{01} , R_{01} и h_{02} , R_{02} – габаритные размеры торцевых областей зоны защиты молниеотводов 1 и 2; R_C , h_C и R_{CH} – параметры внутренней области зоны защиты, зависящие от надежности защиты, высоты молниеотводов, расстояния между ними и высоты анализа; HA_1 , HA_2 , HA_3 и HA_4 – высоты анализа, причем $HA_1 \leq h_{01}$, $HA_2 \leq h_{01}$, $h_{01} < HA_3 \leq h_C$, $h_C < HA_4 < h_{02}$; R_{H1} и R_{H2} – радиусы конусов торцевых областей зоны защиты на соответствующих высотах анализа HA для молниеотводов 1 и 2 соответственно; 1 – 10, 2' – 10' – концевые точки фигур на различных высотах анализа

Для определения параметров (h_{C1} , h_{C2}), входящих в состав соотношения (2), в РД используются формулы для соответствующих параметров двойного стержневого молниеотвода (при $h_1 = h_2$).

Как видно из рис. 1 рельеф зоны защиты ДРМ определен параметрами, ори-

ентированными на ее графическое построение, и достаточно сложен для проведения численных расчетов, необходимость в которых возникает, в частности, при компьютерном моделировании молниезащищенности различных объектов.

Действующий с 2009 года в Украине [2] (далее – ДСТУ), к сожалению, не содержит расчетных соотношений для определения габаритных размеров зоны защиты ДРМ, а только лишь предусматривает возможность использования неких специальных программ. Учитывая идентичность подходов к построению зон защиты молниеотводов в РД и ДСТУ, ДРМ, построенный на основании данных ДСТУ, как и в РД, будет также содержать внутреннюю область с рельефом, достаточно сложным для проведения численных расчетов. Снижения затрат ресурсов ЭВМ при проведении расчетов зон защиты со сложным рельефом поверхности можно достичь, используя предложенный авторами метод конечных точек [3], сущность которого состоит в определении координат конечных точек фигур, составляющих замкнутую линию границы зоны защиты, и радиуса дуг окружности (R_H) на заданной высоте анализа, и определении с их помощью координат любых точек зоны защиты.

Целью настоящей работы является вывод аналитических выражений координат конечных точек ДРМ, необходимых для построения его зоны защиты в процессе компьютерного моделирования молниезащищенности объектов.

Материалы и результаты исследований. Детальный анализ материалов РД показывает, что в зависимости от параметров, входящих в (1) – (3), зоны защиты имеют вид, отличный от приведенного в РД (см. рис. 1). Расчетные зоны защиты ДРМ для надежности 0,995 приведены на рис. 2–4. В зависимости от соотношений между параметрами зоны защиты (h_1 , h_2 , L , h_C и R_C) изменяется ее вид, а, следовательно, и выражения для конечных точек.

Для варианта зоны защиты при условиях $h_{01} < h_C < h_{02}$ и $R_C \leq \sqrt{R_{02}^2 - L^2/4}$ (см. рис. 2) конечная точка 2' представляет собой пересечение дуги окружности (радиусом R_{H2}), образованной зоной защиты большего молниеотвода и касательной к дуге окружности (радиусом R_{H1}), образованной зоной защиты меньшего молниеотвода, проведенной из точки с координатами ($L/2$; R_{CH}).

Соотношения для определения параметров h_{01} , h_{02} , R_{01} , R_{02} , h_{C1} , h_{C2} приведены в табл. 1.

Учитывая, что в ДСТУ отсутствуют соотношения, позволяющие рассчитывать зону защиты ДРМ, в качестве аналога примем базовые соотношения (1) – (3) методики построения зоны защиты двух стержневых молниеотводов разной высоты, приведенные в РД. В качестве соотношений для определения параметров (1) – (2) используем соотношения, приведенные в ДСТУ для двойного стержневого молниеотвода с одинаковой высотой стержней. В табл. 2 приведены соотношения для определения параметров h_{01} , h_{02} , R_{01} , R_{02} в зависимости от надежности защиты и высоты молниеотводов.

Параметры h_{C1} и h_{C2} в зависимости от надежности защиты, высоты молниеотводов и граничных расстояний между ними (см. табл. 3) определяются по (4) и (5).

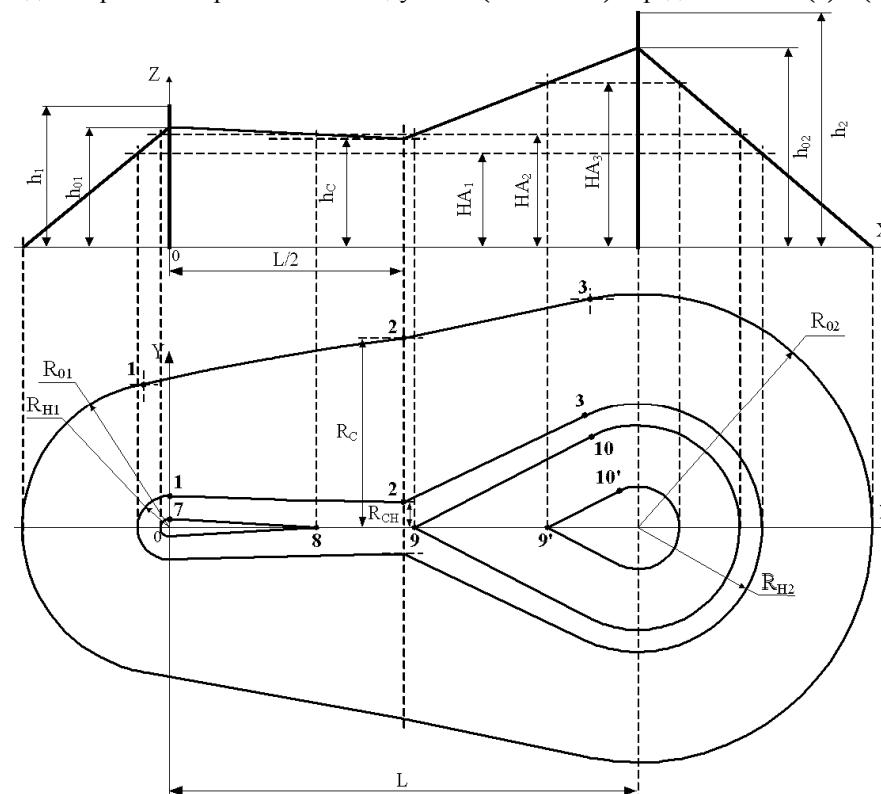


Рисунок 3 – Зона защиты ДРМ и ее границы на характерных высотах анализа для надежности защиты 0,995 при $h_1 < h_2$ и $h_C \leq h_{01}$; $HA_1 \leq h_C$, $h_C < HA_2 \leq h_{01}$, $h_{01} < HA_3 < h_{02}$. Обозначения те же, что и на рис. 2.

Таблица 1

Надежность защиты, P_z	Высота молниеотвода h , м	Высота конуса h_0 , м	Радиус конуса на уровне грунта R_0 , м	Условие	Высота зоны защиты посередине между молниеотводами h_C , м
0,95	от 0 до 150	0,92h	1,5h	$L \leq h$	h_0
				$h < L \leq 6h$	$h_0 - 0,14 (L - h)$
0,995	от 0 до	0,85h	$(1,1 - 0,002h)h$	$L \leq h$	h_0

	150			$h < L \leq 6h$	$h_0 - (0,17 + 3 \cdot 10^{-4}h) \cdot (L - h)$
--	-----	--	--	-----------------	---

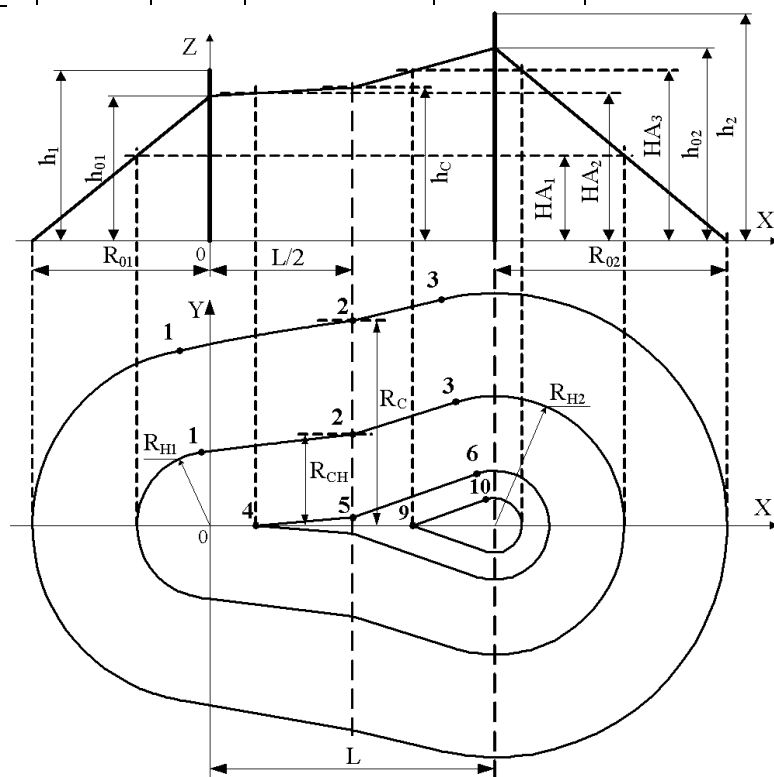


Рисунок 4 – Зона защиты ДРМ и ее границы на характерных высотах анализа для надежности защиты 0,995 при $h_1 < h_2$ и $h_{01} < h_c < h_{02}$ и $R_c = \sqrt{R_{02}^2 - L^2/4}$; $HA_1 \leq h_{01}$, $h_{01} < HA_2 \leq h_c$, $h_c < HA_3 < h_{02}$. Обозначения те же, что и на рис.2.

Таблица 2

Надежность защиты, P_z	Высота молниеотвода h , м	Высота конуса h_0 , м	Радиус конуса на уровне грунта R_0 , м
0,9	от 0 до 100	0,85h	1,2h
	от 100 до 150		$[1,2 - 1 \cdot 10^{-3}(h - 100)] h$
0,99	от 0 до 30	0,8h	0,8h
	от 30 до 100		$[0,8 - 1,43 \cdot 10^{-3} \times (h - 30)] h$
	от 100 до 150		$[0,8 - 1 \cdot 10^{-3}(h - 100)] h$
0,999	от 0 до 30	0,7h	0,6h

	от 30 до 100	$[0,7 - 7,14 \cdot 10^{-4} \times (h - 30)] h$	$[0,6 - 1,43 \cdot 10^{-3} \times (h - 30)] h$
	от 100 до 150	$[0,65 - 1 \cdot 10^{-3}(h - 100)] h$	$[0,5 - 2 \cdot 10^{-3}(h - 100)] h$

Таблица 3

Надежность защиты, P_z	Высота молниеотвода h , м	L_c , м	L_{max} , м
0,9	от 0 до 30	2,5 h	5,75 h
	от 30 до 100		$[5,75 - 3,57 \cdot 10^{-3} \times (h - 30)] h$
	от 100 до 150		5,5 h
0,99	от 0 до 30	2,25 h	4,75 h
	от 30 до 100	$[2,25 - 0,0107(h - 30)] h$	$[4,75 - 3,57 \cdot 10^{-3} \times (h - 30)] h$
	от 100 до 150	1,5 h	4,5 h
0,999	от 0 до 30	2,25 h	4,25 h
	от 30 до 100	$[2,25 - 0,0107(h - 30)] h$	$[4,25 - 3,57 \cdot 10^{-3} \times (h - 30)] h$
	от 100 до 150	1,5 h	4,0 h

При выполнении условия $L \leq L_{Ci}$ величина h_{Ci} определяется по (4), а при $L_{Ci} < L \leq L_{maxi}$ величина h_{Ci} определяется по (5) где i – номер молниеотвода, 1 или 2.

$$h_{Ci} = h_{0i}; \quad (4)$$

$$h_{Ci} = h_{0i} \frac{L_{maxi} - L}{L_{maxi} - L_{Ci}}; \quad (5)$$

В зависимости от соотношений между параметрами зоны защиты изменяется и ее форма. Характерные формы зон защиты на различных высотах анализа (НА) для ДРМ при определенных соотношениях параметров приведены на рис. 2 – 4.

Выведенные координаты концевых точек, указанных на рис. 2 – 4 приведены в табл. 4.

$$R_{H1} = \frac{R_{01}}{h_{01}} (h_{01} - HA); \quad (6)$$

$$R_{H2} = \frac{R_{02}}{h_{02}} (h_{02} - HA); \quad (7)$$

$$A = \frac{2R_{H1}R_{CH}\sqrt{4R_{CH}^2 + L^2 - 4R_{H1}^2} - 2LR_{H1}^2}{4R_{CH}^2 + L^2}; \quad (8)$$

$$B = \frac{L(h_A - h_{01})}{2(h_C - h_{01})}; \quad (9)$$

$$C = \frac{LR_{H2} \sqrt{4R_{CH}^2 + L^2 - 4R_{H2}^2} + 4R_{H2}^2 R_{CH}}{4R_{CH}^2 + L^2}; \quad (10)$$

$$D = \frac{L(h_{02} - h_A)}{2(h_{02} - h_C)}; \quad (11)$$

$$E = \frac{2AR_{CH} + L\sqrt{R_{H1}^2 - A^2}}{2A + L}; \quad (12)$$

$$F = \frac{2(\sqrt{R_{H1}^2 - A^2} - R_{CH})}{2A + L}; \quad (13)$$

$$G = \sqrt{R_{H2}^2(F^2 + 1) - E^2 - L^2F^2 + 2LEF}. \quad (14)$$

Таблица 4

№ точки	Координата X	Координата Y
1	- A	$\sqrt{R_{H1}^2 - A^2}$
2	L/2	R_{CH}
2'	$\frac{(EF + L) - \sqrt{R_{H2}^2(F^2 + 1) - E^2 - L^2F^2 + 2LEF}}{F^2 + 1}$	$\sqrt{R_{H2}^2 - \left(L - \frac{EF + L - G}{F^2 + 1}\right)^2}$
3	$L - \sqrt{R_{H2}^2 - C^2}$	C
4	B	0
5	L/2	R_{CH}
6	$L - \sqrt{R_{H2}^2 - C^2}$	C
7	$\frac{R_{H1}^2}{B}$	$\frac{R_{H1}}{B} \sqrt{B^2 - R_{H1}^2}$
8	B	0
9 (9')	L - D	0
10 (10')	$L - \frac{R_{H2}^2}{D}$	$\frac{R_{H2}}{D} \sqrt{D^2 - R_{H2}^2}$

Примечание: Номера точек соответствуют обозначениям на рис.2 – 4.

Соотношения, приведенные в табл. 4 и (6) – (14), для определения координат концевых точек фигур, образующих границу зоны защиты ДРМ справедливы для случаев:

- при $L \leq L_{\max 1}$ для надежностей защиты 0,9, 0,99 и 0,999;

- при $L \leq 6h_1$ для надежности защиты 0,95;
- при $L \leq 4h_1$ для надежности защиты 0,995.

При этом в соотношениях изменяются лишь габаритные размеры ($h_1, h_2, L, h_{01}, h_{02}, R_{01}, R_{02}, h_C, R_C, R_{CH}, R_{H1}, R_{H2}$) зоны защиты.

При расстоянии между молниеотводами $L > L_{\max 1}$ для надежностей защиты 0,9, 0,99, 0,999, при $L > 4h_1$ для надежности защиты 0,995 и при $L > 6h_1$ для надежности защиты 0,95 их следует рассматривать как одиночные стержневые молниеотводы.

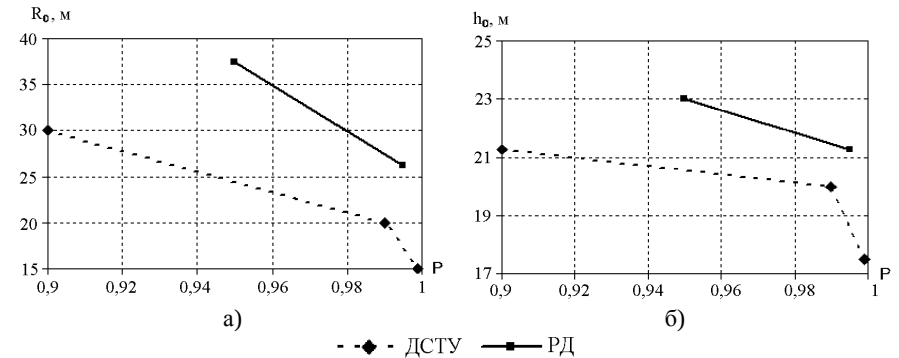


Рисунок 5 – Сравнение параметров (R_0 и h_0) торцевых областей зоны защиты для одиночного стержневого молниеотвода высотой 25 м по РД и ДСТУ в зависимости от значений надежности защиты P

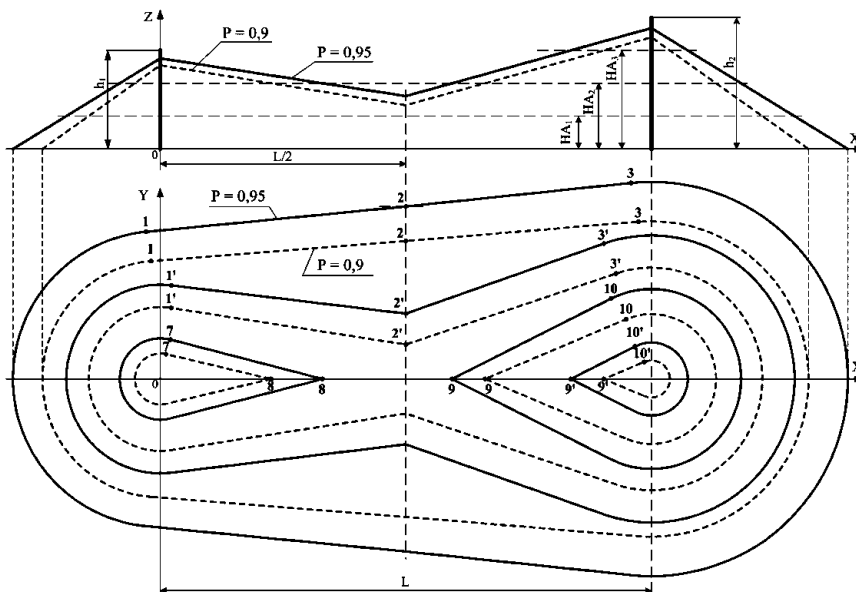


Рисунок 6 – Сравнение зон защиты ДРМ для надежностей защиты $P = 0,9$ и $P = 0,95$

Для проверки выведенных соотношений и анализа зоны защиты ДРМ была разработана компьютерная программа в среде электронных таблиц Microsoft Excel с использованием приложения Visual Basic for Applications, которая позволяет определить основные параметры зоны защиты ДРМ, координаты концевых точек на заданных высотах анализа и выдает полученные результаты (границы зоны защиты) в графическом виде.

Как указывалось выше, габаритные размеры торцевых областей зоны защиты ДРМ определяются исходя из параметров зоны защиты одиночных стержневых молниеотводов. Анализ параметров зоны защиты одиночных стержневых молниеотводов по материалам РД и ДСТУ (см. табл. 1 и табл. 2) показывает, что при одной и той же степени надежности (терминология РД) (надежности защиты (терминология ДСТУ)) зоны защиты имеют различные габаритные размеры (см. рис. 5). Объяснение этого факта отсутствует в известной авторам литературе и подлежит объяснению разработчиками ДСТУ, так как они ввели более жесткие нормы.

В связи с вышеизложенным было проведено сравнение зон защиты ДРМ, построенных для надежности защиты 0,9 и 0,95, которое приведено на рис. 6. Из приведенного сравнения видно, что сохраняется та же тенденция. И, как следствие, зона защиты более жесткого случая (при $P = 0,95$) оказалась больше, чем менее жесткого (при $P = 0,9$).

Так как существует множество объектов, спроектированных для надежно-

стей, приведенных в РД, а вновь введенный нормативный документ ДСТУ распространяется как на вновь строящиеся, так и на эксплуатируемые объекты, то возникает необходимость проверки их надежности защиты.

Выводы.

1. Разработана математическая модель для расчета зоны защиты ДРМ, необходимая для создания программного обеспечения, предусмотренного ДСТУ.
2. Показано, что в зависимости от соотношения между параметрами ДРМ изменяется форма и габариты его зоны защиты.
3. Приведены аналитические выражения для определения координат концевых точек, необходимых для построения зоны защиты ДРМ, которые были использованы для компьютерного моделирования молниезащищенности объектов.
4. На базе выведенных математических соотношений разработана программа, позволяющая производить построения зоны защиты ДРМ заданных параметров на четырех высотах анализа согласно РД и ДСТУ.
5. Проведенное сравнение зон защиты ДРМ, рассчитанных по РД и ДСТУ, выявило проблему преемственности этих нормативных документов. Это, в конечном итоге, не позволяет утверждать, что в настоящее время молниезащищенность какого-либо из объектов Украины отвечает требованиям нового нормативного документа (ДСТУ).

Список литературы: 1. Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений: РД 34.21.122-87 / М-во энергетики и электрификации СССР. – Офиц. изд. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 56 с. 2. Улаштування блискавкозахисту будівель і споруд (ІЕС 62305:2006, NEQ): ДСТУ Б В.2.5-38:2008. – [Чинний від 2009–01–01]. – К. : Мінірегіонбуд України, 2008. – 48 с. – (Національний стандарт України). 3. Методика аналізу молниезахищеності об'єктів при складному рельєфі поверхні зони захисту / С.В.Куприч, А.А.Петков, Д.Г.Колушко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – 2008. – №21. – С. 66–78.

Поступила в редколлегию 05.11.2009.

УДК 621.317.3

В.В.КНЯЗЕВ, канд.техн.наук, вед.науч.сотр., НТУ «ХПИ»;
В.И.КРАВЧЕНКО, докт.техн.наук, профессор, НТУ «ХПИ»;
И.П.ЛЕСНОЙ, зав.лаб., НТУ «ХПИ»;
Ю.С.НЕМЧЕНКО, гл.метролог, НТУ «ХПИ»

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ ВЫСОКИХ ИМПУЛЬСНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ЭТАЛОНЕ-ТН

Описано метрологічне обладнання для атестації засобів вимірювання високих імпульсних напруг практично при реальних параметрах вимірюваних напруг. Наведена методика метрологічної атестації засобів вимірювання високих імпульсних напруг, а також експериментальні результати цієї процедури на макеті омичного дільника напруги на 300 кВ.

Metrological equipment for qualification of the facilities of the measurement of the high pulsed voltages under real parameter of the measured voltages practically is described. The procedure of metrological qualification of the facilities of the measurement of the high pulsed voltages, as well as experimental results of this procedure on model ohmic divider of the voltage on 300 kV are brought.

1. Актуальность. Мировая практика метрологической аттестации (МА) средств измерения высоких импульсных напряжений, обычно это делители напряжения различного типа (УИВН), заключается в обязательном экспериментальном определении таких характеристик:

- формы и временных параметров переходной характеристики (ПХ), включая, в первую очередь, время нарастания ПХ ($T_n^{ПХ}$);
- коэффициента деления K_o^{BH} на высоком импульсном напряжении.

При этом ПХ УИВН определяется при помощи специальных генераторов единичных скачков напряжения (ГЕСН), как правило, сравнительно низковольтных. Используемые в Украине ГЕСН имеют выходное напряжение до 400 В [1]. В то же время, K_o^{BH} определяется наиболее достоверно на высоком импульсном напряжении (ВН) при помощи стандартизованного образцового средства измерения ВН – шаровых разрядников (ШИР) [2, 3].

Оба этих этапа имеют сложности, особенно при МА УИВН, предназначенных для измерения импульсов напряжения с амплитудой более 500 кВ. Сложности таковы:

1) УИВН обычно имеют коэффициент $K_o^{BH} \geq 10000$, чтобы можно было подключать к низковольтному плечу УИВН стандартный осциллограф. В этом случае при подключении к УИВН низковольтного ГЕСН выходное напряжение УИВН при определении ПХ имеет малую величину (единицы или десятки милливольт), что в условиях сопровождения полезного сигнала различного рода шумами, не позволяет определять параметры ПХ с высокой точностью;

2) процесс определения K_o^{BH} при помощи ШИР связан с такими проблемами:

- ШИР для напряжений более 500 кВ должны иметь диаметр не менее 0,5 м. Такие ШИР – это громоздкие, как правило, стационарные конструкции весом более 500 кг;
- процедура МА при помощи ШИР включает определение 50 % пробивного напряжения, что требует продолжительного времени, связанного с необходимостью набора статистических данных;
- пробивное напряжение ШИР чувствительно к влиянию внешних климатических факторов (давление, влажность, температура окружающей среды, различного рода излучения);
- погрешность измерения ВН при помощи ШИР не менее 3 %.

Кроме того, ШИР применим только для аттестации УИВН микросекундного и более длительного диапазонов [2], и не пригоден для УИВН наносекундного диапазона.

Поэтому для расширения возможностей проведения МА УИВН, предна-

значенных для измерения импульсов высокого напряжения произвольной формы, а также, упрощения процедуры МА и получения более достоверных данных о параметрах УИВН в НИПКИ «Молния» разработан альтернативный метод. Этот метод позволяет проводить измерения ПХ УИВН любого вида, а также более точно (менее 3 %) определять K_o^{BH} для УИВН на диапазон напряжений до 50 кВ. Следует отметить, что получить от ШИР в этом амплитудном диапазоне напряжений даже декларируемую точность весьма проблематично.

2. Метод решения проблемы. Такой альтернативный метод МА основан на использовании Исходного Эталона Украины единиц максимальных значений напряженностей импульсных электрического – вольт на метр (В/м) и магнитного – ампер на метр (А/м) полей (Эталон РЭМП).

Основное назначение Эталона РЭМП – метрологическая аттестация и проверка средств измерения напряженностей импульсных электрических и магнитных полей (СИТ-Е, СИТ-Н). Технические и метрологические характеристики описаны в [4,5].

Эталон РЭМП содержит полеобразующие элементы, отвечающие за создание в их рабочем объеме аттестационных электрических и магнитных полей. Такими элементами являются согласованные на концах закрытые, симметричные полосковые линии (ТЕМ-ячейки) с габаритами рабочих объемов 1 x 1,2 x 0,24 м (ПЛ-24) и 2,2 x 1,6 x 0,48 м (ПЛ-48), в которых формируется плоская электромагнитная волна (рис. 1).

Две полосковые линии нужны для того, чтобы в одной из них, ПЛ-24, получать скачкообразные импульсы с длительностью фронта 0,7 нс и длительностью импульса 100 нс, а во второй – ПЛ-48 – получать биэкспоненциальные импульсы с длительностью фронта 8 нс и постоянной спада – до нескольких секунд (при отключении согласующей нагрузки от ПЛ-48) при максимальной напряженности электрического поля до 200 кВ/м.

Вторичными параметрами работающих ПЛ, создающих электрические поля, являются напряжения между электродами ПЛ. До недавнего времени на эти напряжения не обращали особого внимания, однако сейчас это мнение пересмотрено в связи с решением использовать Эталон РЭМП для метрологической аттестации УИВН при помощи импульсных напряжений в ПЛ. В этом случае Эталон РЭМП становится источником единиц максимальных значений высоких импульсных напряжений – вольт (В) и в этом режиме ему присвоена новая аббревиатура Эталон-ТН.

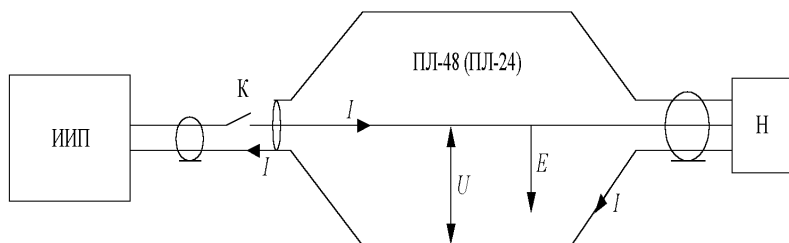


Рисунок 1 – Концептуальная схема Эталона РЭМП

ИИП – импульсный источник питания; К – коммутатор; Н – нагрузка; ПЛ-48 (ПЛ-24) – полосковые линии; I – ток; U – напряжение; E – напряженность электрического поля

В данной статье рассматривается процедура использования Эталона-ТН для генерирования единиц максимальных значений высоких импульсных напряжений – вольт (В), первоначально в ПЛ-48 (рис. 2).



Рисунок 2 – Общий вид ПЛ-48

Упрощенная схема замещения Эталона-ТН (без аттестуемого УИВН) приведена на рис. 3.

Под выходными импульсами напряжения Эталона-ИН мы считаем напряжение между электродами ПЛ-48 в любой ее точке, так как это напряжение практически одинаково по всей длине ПЛ. В Эталоне-ТН величина зарядного напряжения емкостного накопителя энергии может изменяться от 1 до 50 кВ. Как показала практика, импульсное напряжение между электродами ПЛ также равно этим величинам вследствие согласованности ПЛ и практической малости активных потерь в элементах Эталона-ТН.

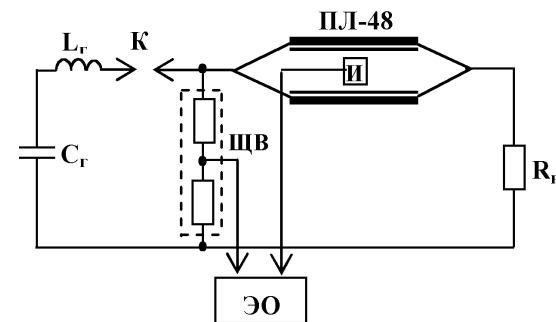


Рисунок 3 – Схема замещения Эталона-ТН

C_r – емкость разрядного конденсатора; L_r – суммарная индуктивность разрядного контура; К – высоковольтный коммутатор; ПЛ-48 – полосковая линия; R_n – согласующая нагрузка ПЛ; ЩВ – щуп высоковольтный Р6015А; И – измеритель СПЕФВ-ЕО

В качестве высоковольтного коммутатора в Эталоне-ТН используется механический коммутатор, в корпус которого закачивается азот с давлением до 6,5 атм.

Для контроля формы и амплитуды импульсов напряжения в ПЛ в Эталоне-ТН используются два измерительных средства:

- высоковольтный щуп Р6015А ТЕКТРОНИХ с амплитудным диапазоном 0,1 – 40 кВ и полосой пропускания 75 МГц, который совместно с осциллографом ТЕКТРОНИХ TDS 2024 имеет паспортную погрешность 1,4 %;
- штатный Эталона РЭМП измеритель напряженности импульсного электрического поля типа СПЕФВ-ЕО с оптоволоконной линией передачи информации, со временем нарастания ПХ 4 нс и амплитудным диапазоном до 200 кВ/м.

Для достоверного определения $T_n^{ПХ}$ необходимо [6], чтобы время нарастания аттестационного импульса напряжения было короче $T_n^{ПХ}$ не менее чем в 3 раза.



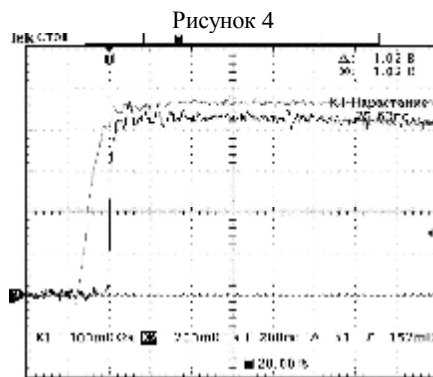


Рисунок 5

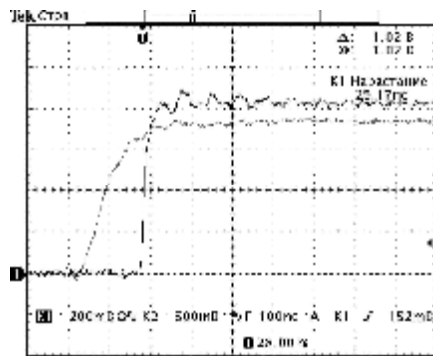


Рисунок 6

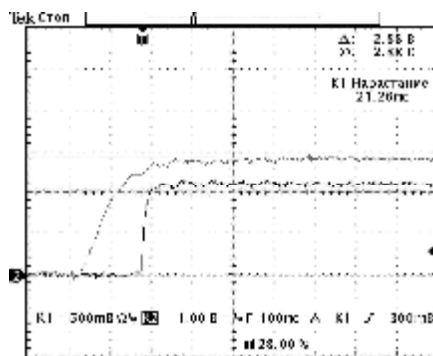


Рисунок 7

Для иллюстрации описанного метода измерения импульса напряжения в Эталоне-ТН был разработан экспериментальный омический делитель напряжения на 300 кВ (рис. 4), который подключался параллельно электродам

ПЛ-48. На рисунках 5-8 приведены осциллограммы фронтальной части напряжений с выходов измерителя СПЕФВ-ЕО и экспериментального УИВН при зарядных напряжениях Эталона-ТН 10; 20; 30; 40 кВ.

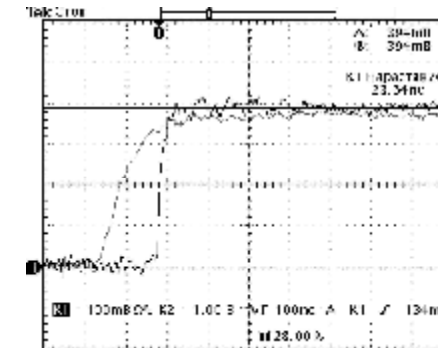


Рисунок 8

3. Выводы. Из осциллограмм на рисунках 5 – 8 видно:

- фронт аттестационного импульса напряжения в Эталоне-ТН при данных развертках осциллографа – это практически вертикальная линия, так как время нарастания этого импульса не превышает 10 нс;
- фронт импульса напряжения на выходе УИВН – значительно более затянут по сравнению с аттестационным импульсом напряжения, что говорит о правильности определения времени нарастания ПХ УИВН из этих осциллограмм;
- $T_n^{ПХ}$ практически одинаково во всем диапазоне аттестационных напряжений и составляет величину ~ 100 нс;
- коэффициент деления K_o^{BH} данного УИВН при всех аттестационных напряжениях составляет величину 10500, что практически соответствует этому коэффициенту, измеренному при постоянном напряжении;
- исходя из величины $T_n^{ПХ}$ экспериментальный УИВН можно применять для измерения импульсов высокого напряжения с длительностью фронта не менее 300 нс.

Список литературы: 1. Генератор крутых всплесков напряжения, тока и магнитного поля ГKB-U,I,H. Руководство по эксплуатации. 2. IEC 60052:2002 Voltage measurement by means of standard air gaps. 3. Edwards F.S., Smee J.F. The Calibration of the Spark-Gap for Voltage Measurement up to one million volts (effective) at 50 cycles / Journal Institution of Electrical Engineers, Vol.82, 1938, p.655-669. 4. Nemchenko Yu. S., Knyazyev V.V., Kravchenko V.I. and Lisnoy I.P. The Development of the Pulse Electromagnetic Processes Measurement Unity Supporting System in Ukraine. 2006 Third International Conference on «Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals». (September 18-22, 2006), Sevastopol, Ukraine 2006, p.363-366. 5. Кравченко В.И., Князев В.В., Лесной И.П., Немченко Ю.С., Гурка Ю.Н. Экспериментальные исследования выходных характеристик Эталона РЭМП // Электротехніка і електромеханіка. – 2008. – № 4. – С. 70-74. 6. ГОСТ 8.256–77 Государственная система обеспечения единства измерения. Нормирование и определение динамических характеристик аналоговых средств измерения. Основные положения.

В.В.КНЯЗЕВ, канд.техн.наук, вед.науч.сотр., НТУ «ХПИ»;
Ю.С.НЕМЧЕНКО, гл.метролог, НТУ «ХПИ»;
И.П.ПЕСНОЙ, зав.лаб., НТУ «ХПИ»;
С.Б.СОМХИЕВ, вед.инженер, НТУ «ХПИ»;
Т.Н.ОСТРОВЕРХ, вед.инженер, НТУ «ХПИ»

УСТАНОВКА У-КП-150 ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ УСТОЙЧИВОСТЬ К КОНДУКТИВНЫМ ПОМЕХАМ В ПОЛОСЕ ЧАСТОТ ОТ 0 ГЦ ДО 150 КГЦ

Описано конструкцію і результати атестації установки У-КП-150, призначеної для випробувань технічних засобів на стійкість до кондуктивних завад у смузі частот від 0 Гц до 150 кГц згідно з діючими в Україні стандартами. Установка генерує кондуктивні завади виду «тривалі і короточасні завади постійного струму», «тривалі і короточасні завади змінного струму частотою 50 Гц» і «перемінні напруги в смузі частот від 15 Гц до 150 кГц».

The design and results to qualifications of the installation U-KP-150, intended for test the technical facilities for immunity to conducted, common mode disturbances in frequency range from 0 Hz to 150 kHz in accordance with acting in Ukraine standard, are described. Installation generates the conducted, common mode disturbances of the type «long and short disturbances of the direct current», «long and short disturbances of alternating current by frequency 50 Hz» and «variable voltages in frequency range from 15 Hz to 150 kHz ».

Кондуктивные помехи (КП) представляют собой общие несимметричные напряжения в полосе частот от 0 до 150 кГц, которые наводятся внешними электрическими полями в электронных технических средствах (ТС). Основными источниками этих полей являются силовые распределительные системы (в том числе постоянного тока и частотой 50 Гц) и силовое электронное оборудование, которое может инжектировать помехи в линии электропитания и в системы заземления, а также в сигнальные линии и линии управления ТС. Поэтому все такого рода ТС обязательно проходят испытания в лабораторных условиях по гармонизированному в Украине международному стандарту ДСТУ ІЕС 61000-4-16:2007 [1].

Ниже описана разработанная и изготовленная в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» установка У-КП-150, предназначенная для лабораторных испытаний ТС на стойкость к КП всех видов по ДСТУ ІЕС 61000-4-16:2007. Выходные параметры испытательной установки У-КП-150 приведены в таблице.

Установка У-КП-150 состоит из двух независимых испытательных комплексов ИК-КП-ППТ и ИК-КП-150. Испытательный комплекс ИК-КП-ППТ предназначен для испытания ТС кондуктивными помехами вида «длительные и кратковременные помехи постоянного тока» обеих полярностей и «длительные и кратковременные помехи переменного тока частотой 50 Гц» по четырем степеням жесткости. Испытательный комплекс ИК-КП-150 предназначен для испытания ТС кондуктивными помехами вида «переменные напряжения в по-

лосе частот от 15 Гц до 150 кГц» по четырем степеням жесткости. Общий вид обоих комплексов приведен на рис. 1 и 2, а структурные схемы – на рис. 3 и 4.

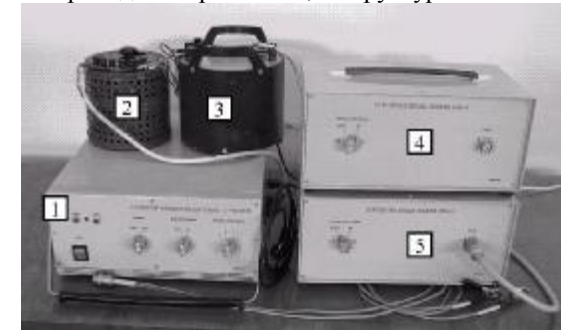


Рисунок 1 – Общий вид испытательного комплекса ИК-КП-ППТ
 1 – генератор Г-КП-ППТ; 2 – автотрансформатор ЛАТР-2; 3 – разделительный трансформатор РТ-2; 4 – устройство ввода помехи однофазное УВП-О; 5 – устройство ввода помехи трехфазное УВП-Т

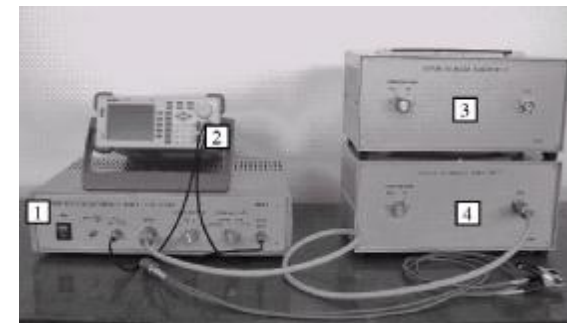


Рисунок 2 - Общий вид испытательного комплекса ИК-КП-150
 1 – генератор Г-КП-150; 2 – генератор синусоидальных сигналов RIGOL DG3121A; 3 – устройство ввода помехи однофазное УВП-О; 4 – устройство ввода помехи трехфазное УВП-Т

Назначение составных частей комплекса ИК-КП-ППТ:

- генератор Г-КП-ППТ предназначен для генерирования кондуктивных помех вида «длительные и кратковременные помехи постоянного тока» обеих полярностей и «длительные и кратковременные помехи переменного тока частотой 50 Гц» по трем степеням жесткости (1 – 3);
- источник питания ИП-300 предназначен для генерирования совместно с Г-КП-ППТ кондуктивных помех вида «длительные и кратковременные помехи постоянного тока» обеих полярностей и «длительные и кратковременные помехи переменного тока частотой 50 Гц» по четвертой степени жесткости. ИП-300 состоит из двух независимых составных частей: автотрансформатора ЛАТР-2 и разделительного трансформатора

РТ-2;

- автотрансформатор ЛАТР-2 предназначен для генерирования в составе Г-КП-ППТ кондуктивных помех вида «кратковременные помехи переменного тока частотой 50 Гц» четвертой степени жесткости;
- разделительный трансформатор РТ-2 предназначен для генерирования в составе Г-КП-ППТ кондуктивных помех вида «кратковременные помехи постоянного тока» и «кратковременные помехи переменного тока частотой 50 Гц» четвертой степени жесткости;

Наименование характеристики	Размерность	Величина
1 Напряжение сети питания	В Гц	220 50
2 Диапазон амплитуд испытательных напряжений установки, $U_{исп}$	В	от 0,9 до 330
3 Время воздействия кратковременной помехи, T	с	1
4 Полоса частот переменного напряжения	кГц	от 0,015 до 150
5 Погрешность измерения амплитуды испытательного напряжения установки	%	1,4
6 Погрешность измерения временных параметров испытательного напряжения	%	0,1
7 Мощность, потребляемая от сети, не более	Вт	100
8 Масса:	кг	
– генератора Г-КП-ППТ		24
– генератора Г-КП-150		11,5
– генератора синусоидальных сигналов RIGOL DG3121A		3,7
– устройства ввода помехи однофазного УВП-О		9
– устройства ввода помехи трехфазного УВП-Т		9
– разделительный трансформатор РТ-2		13
– автотрансформатор ЛАТР-2		8,4
9 Габаритные размеры:	мм	
– генератора Г-КП-ППТ		470х420х290
– генератора Г-КП-150		450х320х120
– генератора синусоидальных сигналов RIGOL DG3121A		460х260х100
– устройства ввода помехи однофазного УВП-О		360х200х160
– устройства ввода помехи трехфазного		

УВП-Т		360х200х160
– разделительный трансформатор РТ-2		Ø 205, l = 205
– автотрансформатор ЛАТР-2		Ø 170, l = 170
10 Время непрерывной работы	час	8

- устройство ввода помех УВП-О предназначено для ввода кондуктивных помех всех видов в однофазные порты питания ТС;
- устройство ввода помех УВП-Т предназначено для ввода кондуктивных помех всех видов в трехфазные порты питания ТС;
- кабель К-ЭК предназначен для ввода кондуктивных помех всех видов в экранированные кабели ТС.

Назначение составных частей комплекса ИК-КП-150:

- генератор Г-КП-150 предназначен для генерирования кондуктивных помех вида «переменные напряжения в полосе частот от 15 Гц до 150 кГц» по четырем степеням жесткости;
- генератор синусоидальных сигналов RIGOL DG3121A в режиме генератора качающейся частоты «SWEEP» предназначен для запитки генератора Г-КП-150 напряжениями синусоидальных колебаний частотой от 15 Гц до 150 кГц.



Генератор Г-КП-ППТ собран в металлическом корпусе с габаритами 470х420х290 мм. Общий вид генератора Г-КП-ППТ показан на рис. 5.

На передней панели генератора Г-КП-ППТ, рис. 6, расположены следующие органы управления и контроля:

- клавиша СЕТЬ с подсветкой служит для подачи напряжения питания 220 В 50 Гц на генератор Г-КП-ППТ и для его отключения после окончания работы;
- кнопка ПУСК служит для запуска генератора Г-КП-ППТ как в длительном, так и в кратковременном режимах его работы. При нажатии этой кнопки загорается индикаторный светодиод;
- кнопка СТОП служит для остановки генератора Г-КП-ППТ, работающего в длительном режиме;
- переключатель СТЕПЕНЬ ЖЕСТКОСТИ служит для установления уровня испытательного напряжения генератора Г-КП-150 и имеет четыре положения: «1», «2», «3», «4»;
- переключатель РЕЖИМ служит для установления режима работы и имеет два положения: «ДЛИТ» и «1 сек»;
- переключатель ВИД ИСПЫТАНИЙ имеет два положения: «50 Гц» и «ПТ» и служит для установления кондуктивных помех постоянного тока (ПТ) или кондуктивных помех переменного тока (50 Гц).



Рисунок 5 – Общий вид генератора Г-КП-ППТ



Рисунок 6 – Передняя панель генератора Г-КП-ППТ

На задней панели генератора У-КП-ППТ (рис. 7) расположены следующие органы управления и контроля:

- разъем ВЫХОД служит для подключения генератора Г-КП-ППТ или к УВП обоих видов через кабель СК-1, или к экранированным кабелям ТС через кабель К-ЭК;
- разъем ВНЕШНИЙ ИСТОЧНИК служит для подключения генератора Г-КП-ППТ к внешнему источнику через кабель К-РТ-3;
- колодка КОНТР. $U_{вых}/100$ служит для подключения выхода генератора Г-КП-ППТ к осциллографу ЭО;
- тумблер «+» и «-» служит для измерения полярности кондуктивной помехи постоянного тока;
- клемма $\perp$ служит для подключения генератора Г-КП-ППТ к контуру заземления;
- предохранитель 5 А.

На боковой стенке генератора Г-КП-ППТ установлен разъем СЕТЬ.

Генератор Г-КП-150 собран в металлическом корпусе с габаритами 450x320x120 мм. Общий вид генератора Г-КП-150 показан на рис. 8.



Рисунок 7 – Задняя панель генератора У-КП-ППТ



Рисунок 8 – Общий вид генератора Г-КП-150

На передней панели генератора Г-КП-150, рис. 9, расположены следующие органы управления и контроля:

- клавиша СЕТЬ с подсветкой служит для подачи напряжения питания 220 В 50 Гц на генератор Г-КП-150 и для его отключения после окончания работы;
- разъем ВХОД (к ГРЧ) служит для подключения при помощи кабеля СК-2-1 к выходу «OUTPUT» генератора RIGOL DG3121A;
- разъем ВЫХОД служит для подключения к нему кабелей К-ЭК или СК-1;
- переключатель СТЕПЕНЬ ЖЕСТКОСТИ служит для установления уровня испытательного напряжения генератора Г-КП-150 и имеет четыре положения: «1», «2», «3», «4»;
- переключатель ПОЛОСА ЧАСТОТ, кГц служит для установления диапазона частот и имеет четыре положения: «0,015 – 0,15», «0,15 – 1,5», «1,5 – 15», «15 – 150»;
- разъем КОНТР. $U_{\text{вых}}/10$ служит для подключения к осциллографу ЭО;
- разъем СИГНАЛ ОКОНЧ. служит для подключения генератора Г-КП-150 при помощи кабеля СК-2-2 к разьему «SYNC» генератора RIGOL DG3121A.



Рисунок 9 – Передняя панель генератора У-КП-150

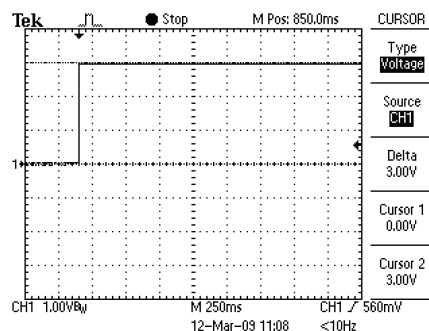


Рисунок 10 – Типовая осциллограмма выходного напряжения типа «Длительные помехи постоянного тока»

На задней панели генератора У-КП-150 расположены:

- разъем кабеля питания;

- клемма $\perp$ для подключения генератора Г-КП-150 к контуру заземления.

На рис. 10 – 13 показаны результаты измерения выходного напряжения на выходе испытательного комплекса ИК-КП-ППТ в разных режимах работы.

На рис. 14 показана типовая осциллограмма результатов измерения выходного напряжения на выходе испытательного комплекса ИК-КП-150.

Установка У-КП-150 успешно прошла государственную аттестацию и успешно применяется в Центре сертификационных испытаний НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» для проведения различного рода испытаний ТС, включая сертификационные, на стойкость к кондуктивным помехам в полосе частот от 0 Гц до 150 кГц по ДСТУ ИЕС 61000-4-16:2007.

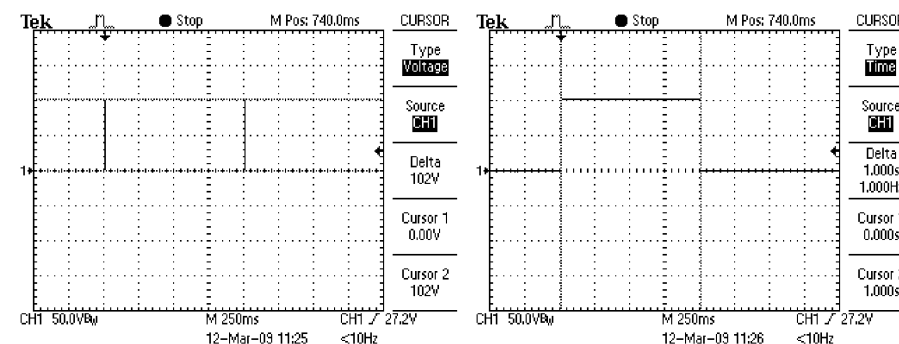


Рисунок 11 – Типовые осциллограммы выходного напряжения типа «Кратковременные помехи постоянного тока»

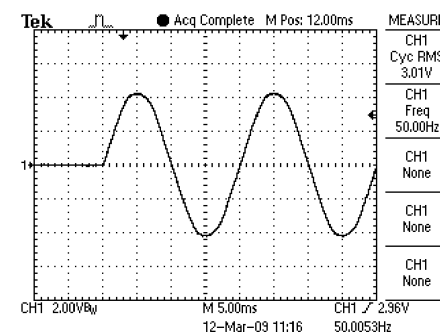


Рисунок 12 – Типовая осциллограмма выходного напряжения типа «Длительные помехи переменного тока частотой 50 Гц»

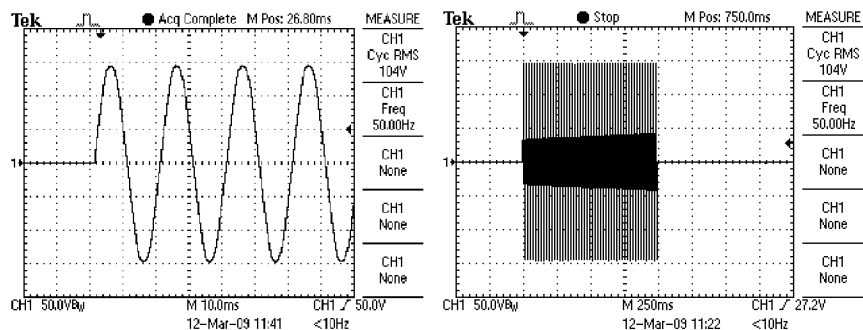


Рисунок 13 – Типовые осциллограммы выходного напряжения типа «Кратковременные помехи переменного тока частотой 50 Гц»

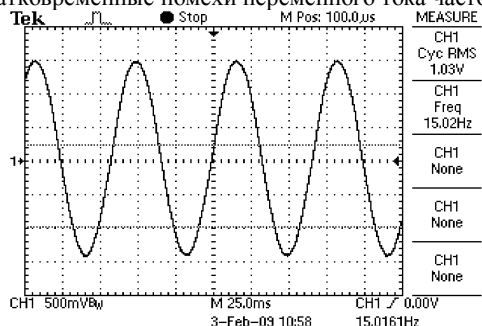


Рисунок 14 – Типовая осциллограмма результатов измерения выходного напряжения на выходе испытательного комплекса ИК-КП-150

Список литературы: 1. ДСТУ ІЕС 61000-4-16:2007 Електромагнітна сумісність. Частина 4-16. Методи випробування та вимірювання. Випробування на несприйнятливості до кондуктивних несиметричних завад у діапазоні частот від 0 Гц до 150 кГц.

Поступила в редколлегию 13.10.2009

УДК 533.9.082.5 : 533.9

Ю.В.КОВТУН, ННЦ ХФТИ НАНУ;

А.И.СКИБЕНКО, канд.физ.-мат.наук, ННЦ ХФТИ НАНУ;

Е.И.СКИБЕНКО, канд.физ.-мат.наук, ННЦ ХФТИ НАНУ;

Ю.В.ЛАРИН, ННЦ ХФТИ НАНУ;

В.Б.ЮФЕРОВ, докт.техн.наук, ННЦ ХФТИ НАНУ

ИЗЛУЧЕНИЕ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ ПЛАЗМЫ ИМПУЛЬСНОГО ОТРАЖАТЕЛЬНОГО РАЗРЯДА

У даній роботі наведені попередні дані проведеного вимірювання параметричних залежностей інтенсивності оптичного випромінювання із плазмового середовища, елементного складу утворюваної плазми, а також проведено порівняльний аналіз випромінювання різних газометалевих плазм однакової середньої щільності в досліджуваному діапазоні довжин хвиль, з огляду можливого використання цих даних в сепараційних технологіях.

The paper presents previous measurement data on parametric dependences of the intensity of optical irradiation from the plasma medium and on the elemental composition of plasma formed. A comparative analysis of the data on irradiation from different gas-metal plasmas of a similar mean density in the investigated wavelength range is performed with the view of applying them in the separation technologies.

Отражательный разряд, известный также как разряд Пеннинга или флипсовский разряд, представляет собой разряд с осесимметричной геометрией, который протекает в скрещенных электрических и магнитных полях [1]. В настоящее время разряд Пеннинга, который реализуется в большом количестве прикладных и технических задач, несмотря на долгую историю продолжает интенсивно исследоваться [2,3]. Однако несмотря на это в исследовании импульсного отражательного разряда существует пробел экспериментальных данных, в частности в определении элементного состава и интенсивности излучения с плазмы, а также при исследовании свойств многокомпонентных как газовых, так и газометаллических плазм, что очень важно для определения энергодисбаланса исследуемых систем подобно [4,5].

Данная работа является продолжением работ по исследованию характеристик многокомпонентной газо-металлической плазмы в импульсном отражательном разряде [6,7]. Целью работы являлось измерение параметрических зависимостей интенсивности оптического излучения плазмы, а также проведение сравнительного анализа излучения газо-металлических плазм одинаковой средней плотности, для определения уровня энергетических потерь из объема в исследуемом диапазоне длин волн.

Эксперименты проводились на установке «МАКЕТ» описанной в [6,7]. Газометаллическая плазма образовывалась в результате разряда в среде рабочего вещества, состоящего из H_2 или газовой смеси 88,9 % Kr – 7 % Xe – 4 % N_2 – 0,1 % O_2 и распыленного металлического Ti , нанесенного на торцевые поверхности катодов. Катоды были выполнены из композитного материала, а именно медь, с напыленным по методу КИБ титаном. Разрядная камера откачивалась диффузионным насосом с адсорбционной ловушкой до давления 10^{-6} торг, затем напускался рабочий газ или газовая смесь. Использовались следующие диагностические средства: временная зависимость средней плотности плазмы определялась с помощью СВЧ-интерферометра на рабочей длине волны $\lambda = 8$ мм; регистрация временных зависимостей интенсивности излучения из плазмы в диапазоне длин волн $\lambda = 180-1100$ нм производилась фотодиодом ФДУК-13У, включенным в фотодиодном режиме, при этом постоянная времени фронта нарастания сигнала составляет $\tau_n \sim 300$ пс; элементный состав образуемой плазмы определялся спектрометрическим методом. Излучение регистрировалось через диагностическое окно, находящееся на расстоянии 220 мм от

плазменной границы, выполненное из кварцевого стекла КУ1. Размер фотоприемной поверхности составляет $\varnothing 2,5$ mm, пороговая чувствительность при $\lambda_{\max} P_{\text{пор.}} = 0,4 \cdot 10^{-14} \text{ W/Hz}^{1/2}$. Для проведения измерений излучения в ультрафиолетовом и ближнем инфракрасном диапазонах спектра использовались фильтры: оптические стекла УФС-2 в ультрафиолетовой области и ИКС-1 в инфракрасной. Зависимость коэффициента пропускания $\tau(\lambda)$ фильтров и кварцевого стекла от длины волны λ представлены на рис 1, а; относительная спектральная чувствительность $S(\lambda)_{\text{rel.}} = S(\lambda)/S(\lambda)_{\max}$ ФДУК-13У представлена на рис.1, б.

Измерение излучения из плазмы и средней плотности проводилось при следующих параметрах установки: разрядное напряжение $U_p = 3,4 \text{ kV}$; давление рабочего газа (смеси) $p = 1,5\text{--}2 \cdot 10^{-3} \text{ torr}$; длительность магнитного поля 18 ms ; максимальная величина магнитного поля в сечении расположения диагностических средств составляла $H_{\max} = 4360 \text{ Oe}$; разряд инициировался с задержкой 2 ms относительно включения магнитного поля.

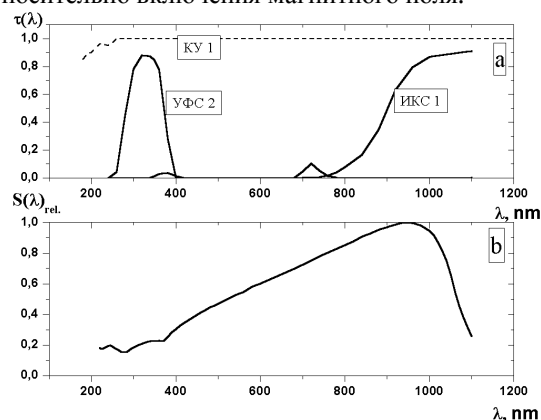


Рисунок 1 – Зависимость коэффициента пропускания $\tau(\lambda)$ фильтров и кварцевого стекла от длины волны λ (а); относительная спектральная чувствительность $S(\lambda)_{\text{rel.}} = S(\lambda)/S(\lambda)_{\max}$ ФДУК-13У (б)

На рис. 2 представлена временная зависимость потока излучения из плазмы, а также средней плотности для водородно-металлической и Kr – Xe – N_2 – O_2 – металлической плазмы. Время нарастания плотности плазмы до значения $N_p \geq 1,7 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ составило $\Delta t \sim 110 \mu\text{s}$ для ($\text{H}_2 + \text{Ti}$) и $\sim 80 \mu\text{s}$ для (Kr – Xe – N_2 – $\text{O}_2 + \text{Ti}$). Помимо первичных атомов Ti, поступающих в разряд за счет корпускулярного взаимодействия с катодами, имеются также атомы других металлов, например, Fe в значительно меньших количествах, за счет распыления конструктивных элементов установки потоками плазмы. Время существования плазменного слоя с плотностью $N_p \geq 1,7 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, регистрируемое по отсечке СВЧ-сигнала, составило $\Delta t \sim 1 \text{ ms}$ для плазмы ($\text{H}_2 + \text{Ti}$), $\Delta t \sim 1,8 \text{ ms}$ (Kr – Xe – N_2 – $\text{O}_2 + \text{Ti}$). Максимальное значение измеренного потока излучения из плазмы составило $3,7 \cdot 10^{-4} \text{ W}$ ($\text{H}_2 + \text{Ti}$), $4,5 \cdot 10^{-4} \text{ W}$ (Kr – Xe – N_2 – $\text{O}_2 + \text{Ti}$),

энергетическая освещенность (облученность) поверхности составляет $7,5 \cdot 10^{-3}$ и $9,2 \cdot 10^{-3} \text{ W/cm}^2$, соответственно. Отношение потока излучения при одинаковой средней плотности в данном диапазоне плотностей для Kr – Xe – N_2 – $\text{O}_2 + \text{Ti}$ и $\text{H}_2 + \text{Ti}$ находится на уровне 1,1–1,3. В рамках геометрической оптики можно оценить объемную мощность излучения в предположении, что плотность и температура изотропны во всем излучающем объеме, при этом максимальное значение объемной мощности составляет $0,5 \text{ W/cm}^3$ ($\text{H}_2 + \text{Ti}$) и $0,63 \text{ W/cm}^3$ (Kr – Xe – N_2 – $\text{O}_2 + \text{Ti}$).

На рис. 3 представлены временные зависимости потока излучения из плазмы Kr–Xe– N_2 – $\text{O}_2 + \text{Ti}$ для различных значений разрядного напряжения. Увеличение разрядного напряжения приводит: к уменьшению времени нарастания плотности плазмы $N_p \geq 1,7 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ до значения $\Delta t \sim 20\text{--}30 \mu\text{s}$; росту времени существования плазменного слоя с плотностью $N_p \geq 1,7 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ до $\Delta t \sim 2,6 \text{ ms}$; увеличению потока излучения из плазмы, при этом фотодиод переходит в режим насыщения и не позволяет регистрировать излучение с потоком выше $7,2 \cdot 10^{-4} \text{ W}$. Временная зависимость потока излучения из плазмы ($\text{H}_2 + \text{металлы}$) для различных диапазонов спектра представлена на рис. 4. Из сравнения приведенных экспериментальных зависимостей видно, что основной вклад в общем потоке излучения приходится на видимую часть спектра ($\sim 80\%$).

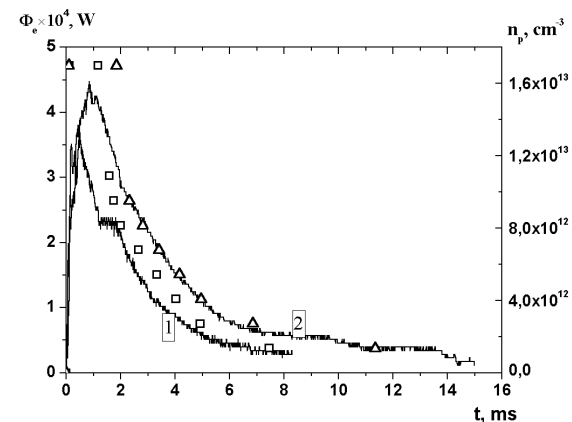


Рисунок 2 – Временная зависимость потока излучения из плазмы (сплошные кривые), а также средней плотности плазмы (точки), $U_p = 3,4 \text{ kV}$.
1– $\text{H}_2 + \text{Ti}$ ($\square$); 2 – Kr – Xe – N_2 – $\text{O}_2 + \text{Ti}$ (Δ)

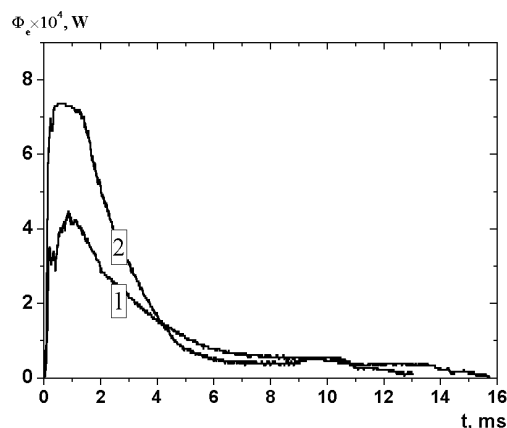


Рисунок 3 – Временная зависимость потока излучения из плазмы (Kr - Xe - N₂ - O₂ + Ti).
1 – U_p = 3,4 kV; 2 – U_p = 4,2 kV

В случае водородно-металлической плазмы основной вклад потерь на излучение вносят примесные ионы [8]. Поэтому проведем оценку количества основных примесей, входящих в состав образуемой плазмы. Основными компонентами водородно-металлической плазмы, определенные спектрометрическим методом (см. рис. 5) ($\lambda = 220-660$ nm) являются: H (рабочий газ), OH и N (следы остаточной атмосферы в объеме разрядной камеры), C, Fe, Ti.

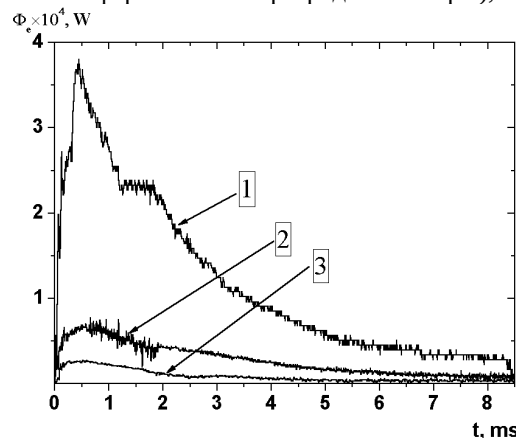


Рисунок 4 – Временная зависимость потока излучения из плазмы (H₂ + Ti).
1 – $\lambda = 180-1100$ nm; 2 – $\lambda = 260-390$ nm; 3 – $\lambda = 810-1100$ nm.

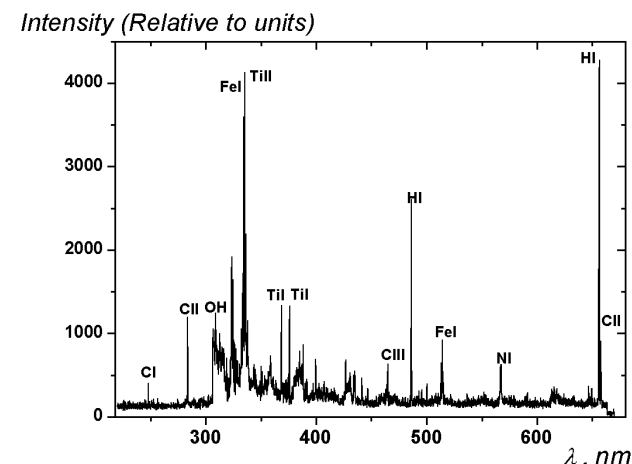


Рисунок 5 – Спектрограмма водородно-титановой плазмы

Используя основные соотношения газокINETической теории переноса нейтральных частиц газа в пространстве «стенка вакуумной камеры-объем плазмы» и учитывая процентное содержание компонентов остаточной атмосферы, расчетным путем, было оценено, что концентрация азота и кислорода в объеме плазмы находится на уровне процента, углерода на уровне нескольких процентов.

Присутствие Fe в разрядной камере, связано с распылением внутренних конструктивных элементов разрядной камеры. Принимая, что распыление происходит по всей внутренней поверхности разрядной камеры за счет высокоэнергетических ионов (то есть с энергией выше порогового значения), общее количество вносимого в разряд железа находится на уровне менее процента. Титан в составе спектра – это материал напыленного слоя катода, который под действием распыления, катодных пятен (дуг), блистиринга попадает в значительном количестве в разряд. Количество титана в разряде определялось путем расчета эффективной скорости ионизации газопаровой смеси с различным процентным содержанием титана и сравнение расчетных значений $\langle \sigma v \rangle_{\text{эффект}}$ с экспериментально полученными для водородно-титановой плазмы, при этом процентное содержание титана в разряде находится на уровне 40 – 50% и более.

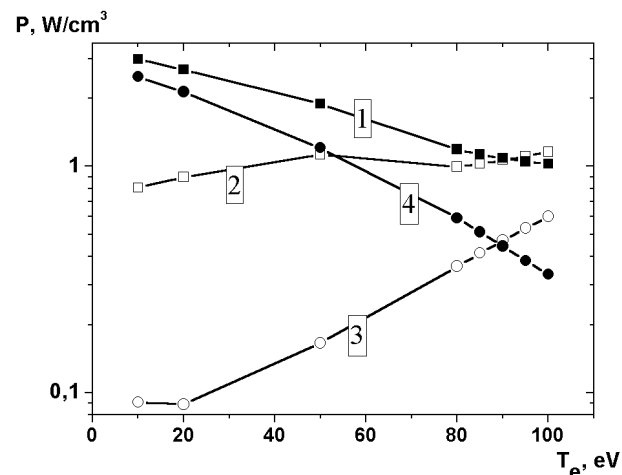


Рисунок 6 – Зависимость суммарных радиационных потерь от температуры электронов. 1 – (■) 40 % Ti - 53,34 % Kr - 4,2 % Xe - 2,4 % N₂ - 0,06 % O₂; 2 – (□) 88,9 % Kr - 7 % Xe - 4 % N₂ - 0,1 % O₂; 3 – (○) 100 % Kr; 4 – (●) 40 % Ti - 55,5 % H₂ - 1 % N₂ - 1 % O₂ - 2 % C - 0,5 % Fe

Суммарная мощность излучательных потерь P_{Σ}^Z на ионах с зарядом Z из единицы объема плазмы складывается из линейчатого P_L^Z , фоторекомбинационного P_R^Z и тормозного P_{Br}^Z , а также излучения, сопровождающего диэлектронную рекомбинацию P_{Dr}^Z и перезарядку P_{Th}^Z . Для оценки мощности излучательных потерь воспользуемся результатами расчетов, приведенных в работе [9] в рамках стационарной коронарной модели для чистых элементов. При этом предполагается, что плазма является оптически тонкой по отношению к собственному излучению; плотность плазмы считается достаточно низкой, так что можно пренебречь ступенчатой ионизацией через возбужденные состояния, следствием этого допущения является то, что энергия, затрачиваемая электронами на возбуждение, всегда теряется в виде излучения; пренебрегается также вкладом циклотронного излучения в полную мощность потерь. Результаты расчета с учетом элементного состава, оцененного выше, при $n_e = 10^{13}$ представлены на рис. 6. Видно, что минимальные потери характерны для чистой криптоновой плазмы (кривая 3); добавка газовых примесей в виде 7 % Xe, 4 % N₂ и 0,1 % O₂ приводит к увеличению потерь примерно на порядок (кривая 2); а введение в состав Ti приводит к нарастанию потерь в диапазоне $T_e = 10 - 90$ эВ (кривые 1,4). Кроме того, наблюдается удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных значений отношения потерь для криптоно-титановой и водородно-титановой плазм. Этот факт свидетельствует, что основные потери на излучение связаны с присутствием титана в разряде.

Такое рассмотрение дает только качественную оценку потерь на излучение из плазмы, поскольку допущение стационарного коронарного равновесия

не полностью оправдано [10]. В реальных условиях эксперимента стационарное равновесие не достигается (атомное время релаксации $\tau \approx 10^{12}/n_e$ больше времени жизни плазмы), процессы перезарядки и диффузии будут влиять на зарядовый состав плазмы. В итоге требуется решение полной системы нестационарных уравнений баланса с учетом перезарядки и диффузии, которое является достаточно непростым и которое предполагается провести в последующих работах.

Выводы. Основные потери на излучение в исследуемых газо-паровых смесях связаны с присутствием титана в разряде. При этом максимальные значения потока излучения из плазмы, измеренные с помощью фотодиода ФДУК-13У, составляют $3,7 \cdot 10^{-4}$ W (H₂+Ti), $4,5 \cdot 10^{-4}$ W (Kr-Xe-N₂-O₂ +Ti), отношение потока излучения при одинаковой средней плотности для Kr-Xe-N₂-O₂ +Ti и H₂+Ti изменяется от 1,1 до 1,3. Основной вклад в общем потоке излучения приходится на видимую часть спектра (~ до 80%). Спектрометрическим методом определены основные компоненты водородно-металлической плазмы (H, OH, N, C, Fe, Ti) и оценено количество примесей, входящих в состав образуемой плазмы. Наблюдается удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных значений отношения потерь для криптоно-титановой и водородно-титановой плазм.

Список литературы: 1. Penning F.M. Ein neues manometer für niedrige gasdrucke, insbesondere zwischen 10^{-3} und 10^{-5} mm // Physica, 1937. – Vol. 4, № 2. – P. 71-75. 2. Toader E.I., Covlea V., Grahamb W.G., Steen P.G. High-density and low electron temperature direct current reflex plasma source // Review of scientific instruments, 2004. – Vol. 75, № 2. – P. 384-386. 3. Taekyun Ha, Sukmin Chung Optimization of cell geometry of a conventional sputter ion pump by a particle-in-cell simulation // Journal of Vacuum Science and Technology A, 2009. – Vol. 27, № 3. – P. 485-491. 4. Дологов А.Н. Скейлинг по току излучательных характеристик микропинчового разряда // Физика плазмы. – 2005. – Т. 31, № 8. – С. 733-741. 5. Морозов Д.Х., Баронова Е.О., Сенченко И.Ю. Излучение примесей в плазме токамака // Физика плазмы, 2007. – Т. 33, № 11. – С. 988-1005. 6. Ковтун Ю.В., Скибенко Е.И., Юферов В.Б. Системы с самовозбуждением ВЧ-колебаний для создания, нагрева и сепарации многокомпонентной плазмы // Вісник Харківського Національного Університету імені В.Н.Каразіна. – № 794, серія фізична: Ядра, частинки, поля. Випуск 1/37/. – 2008. – С. 115-120. 7. Скибенко А.И., Ларин Ю.В., Прокopenko A.B., Незовибатько Ю.Н., Ковтун Ю.В., Скибенко Е.И., Юферов В.Б. Создание и исследование имитационной плазмы на тяжелых газах и парах металлов в импульсном отражательном разряде для сепарационных технологий // Вестник НТУ ХПИ. Тематический выпуск: Техника и электрофизика высоких напряжений. – 2007. – № 34. – С. 104-111. 8. Лысенко Э.А., Скибенко Е.И., Юферов В.Б. Влияние вакуумных условий на поступление легких примесей в плазму на начальной стадии разряда. – М. ЦНИИАтоминформ, 1987. – 18 с. 9. Post D.E., Jensen R.V., Tarter C.B., Grasberger W.H., Lokke W.A. Steady-State radiative cooling rates for low-density, high-temperature plasmas // Atomic data and nuclear data tables. – 1977. – V. 20 – P. 397-439. 10. К.Барнет, М.Харрисон Прикладная физика атомных столкновений. Плазма. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 432 с.

Поступила в редакцию 18.08.2009

УДК 621.31

А.И.КОРОБКО, канд.техн.наук, вед.науч.сотр., НТУ «ХПИ»;
З.И.КОРОБКО, научн.сотр., НТУ «ХПИ»

**МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО**

ОПРЕДЕЛЕНИЮ СТОЙКОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ К ПОРАЖАЮЩЕМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, СВОЙСТВЕННОГО ПРОЯВЛЕНИЯМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ТЕРРОРИЗМА

В статті наведено опис методики обробки результатів експериментальних досліджень для винаходження стійкості радіоелектронних компонентів до вражаючої дії надпотужного імпульсного електромагнітного випромінювання присутнього при проявах електромагнітного тероризму.

In the article description of method of treatment of results of experimental researches is resulted for the invention of firmness of radio electronic components to the striking action of super-power impulsive electromagnetic radiation of present at displays electromagnetic terrorism.

Введение. Как известно, одними из факторов возрастающей угрозы, характеризующих современный мир, являются технологические аспекты современного мира, которые определяются очень широким применением сложных коммуникативных и компьютерных систем, элементная база которых, в силу непрерывного развития микроэлектроники, имеет тенденцию к существенному уменьшению габаритов, и, как следствие становится все более уязвимой к поражающему воздействию электромагнитного излучения (ЭМИ) [1]. В последнее время в современном мире появился совершенно новый фактор электромагнитной угрозы – электромагнитный терроризм [2,3], который как явление представляет собой не меньшую опасность, чем ядерная война.

Все это обуславливает актуальность работ, направленных в первую очередь для уменьшения ущерба вооружению, военной технике, а также критическим объектам государственного значения в случае появления электромагнитной угрозы, свойственной проявлениям электромагнитного терроризма [3,4].

Принимая во внимание крайнюю сложность определения уровней стойкости радиоэлектронных компонентов к поражающему воздействию сверхмощных ЭМИ теоретическим путем, ниже приведена разработанная и практически реализованная методика обработки результатов экспериментальных исследований по данной проблеме [4].

Описание методики. В процессе проведения серии экспериментов для определения одной и той же величины E (напряженности электрического поля при которой происходит необратимый отказ заданного радиотехнического элемента) результаты отдельных измерений отличаются один от одного на величину, которая представляет собой разницу между результатом измерения E_i и действительным значением E_0 , которое измерялось. В нашем случае ошибка измерения в каждом конкретном случае неизвестна.

В соответствии с требованиями ГОСТ [5] для ослабления влияния случайных ошибок необходима обработка полученных в ходе эксперимента данных.

Основной задачей обработки результатов экспериментальных исследований была оценка действительного значения величины E_0 и доверительного интервала ΔE по полученным результатам.

Ошибки измерений характеризуются соответствующим законом их распределения. Наиболее часто используется нормальный закон распределения случайных ошибок, при котором плотность распределения определяется соотношением:

$$P(z) = \frac{1}{s\sqrt{2\pi}} e^{-z^2/2s^2};$$

где σ – среднее квадратичная ошибка измерений, а σ^2 – дисперсия ошибки измерения.

Рабочая гипотеза нормального распределения вероятности определяет дальнейший ход рассуждений и позволяет, например, определить то, что вероятность выхода ошибки за границы «три сигма» настолько мала, что выход за эти границы считают практически невозможным.

В зависимости от того, известно ли заранее среднее квадратичное отклонение или нет, используется различные методики обработки результатов. В данном случае дисперсия заранее неизвестна. Следовательно, для оценки действительного значения измеряемой величины E_0 необходимо задать вероятность P с которой искомая величина попадает в интервал $(E_0 - \Delta E, E_0 + \Delta E)$. Задаваемая вероятность P будет доверительной вероятностью, а определяемый интервал представляет собой доверительный интервал. Доверительная вероятность задается обычно в виде одного из уровней 0,95; 0,99; 0,999 или других значений. Для дальнейших расчетов было выбрано значение вероятности равное 0,95.

В табл. 1 приведены результаты серии из 10 экспериментов по определению напряженности электрического поля, при которой происходит необратимый отказ транзистора КТ312 при воздействии на него ЭМИ с амплитудно-временными параметрами, соответствующими проявлениям электромагнитного терроризма.

Обработка вышеприведенных результатов была проведена в предположении, что измерения независимы и их результаты проведены с одинаковой точностью.

Результаты измерения практически всегда отягощены ошибками. На систематические ошибки были внесены поправки до обработки результатов.

Таблица 1 – Экспериментальные значения напряженности электрического поля, соответствующие полным отказам транзистора КТ312 в серии опытов

Номер измерения, i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
E_i , кВ/м	104,1 3	115,8 3	95,7 8	84,3 2	98,7 2	102,2 5	106,5 5	99,3 4	90,1 7	93,52

Когда все измерения выполнены с одинаковой точностью, то в качестве оценки наиболее вероятного значения (математического ожидания) измеряемой величины принимается среднее арифметическое результатов измерений [6,7], которое выражается следующим образом:

$$\bar{E} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i = 99,06 \text{ (кВ/м)}; \quad (1)$$

где: $\bar{E}$ – среднее арифметическое значение; E_i – текущие значения измеряемой величины, полученные в ходе эксперимента, n – число измерений.

Так как число измерений $n = 10$ ограничено, а значение дисперсии неизвестно, то оценим его по эмпирическому стандарту (выборочной дисперсии) [6,7]:

$$s = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\bar{A} - \bar{A}_i)^2 / (n-1)}, \quad (2)$$

$$s \approx \sigma = 8,89;$$

где s – эмпирический стандарт (выборочная дисперсия).

Для оценки границ доверительного интервала для E при сравнительно малых значениях n ($n = 10$) пользуемся коэффициентом Стьюдента. Тогда погрешность ΔE , ограничивающая доверительный интервал при неизвестной изначально дисперсии, с помощью коэффициента Стьюдента устанавливается соотношением:

$$\Delta E \leq t(P, n) \frac{s}{\sqrt{n}}, \quad (3)$$

где $t(P, n)$ – коэффициенты Стьюдента, при доверительной вероятности P и числе степеней свободы $k = (n-1)$.

Распределение Стьюдента симметрично относительно начала координат. По мере возрастания n распределение стремится к нормальному виду. Основное различие между ними состоит в том, что для закона Стьюдента характерно более медленное убывание плотности вероятности. Эта функция табулирована, некоторые значения коэффициентов Стьюдента, соответствующие заданной вероятности приведены в табл.2 [7].

Таблица 2 – Коэффициенты распределения Стьюдента

n	Заданная вероятность, P			
	0,9	0,95	0,99	0,995
5	2,13	2,78	4,60	5,60
8	1,89	2,36	3,50	4,03
10	1,83	2,26	3,25	3,69
15	1,76	2,14	2,98	3,33
20	1,73	2,09	2,86	3,17

Как видно из представленных данных в табл. 2, при значении доверительной вероятности $P = 0,95$ и числе степеней свободы $k = (n-1) = 9$ искомое значение коэффициента равно $t(0,95;9) = 2,26$.

Полученные значения величин s , t и n позволяют определить из соотношения (3) величину доверительного интервала. $\Delta E = 6,35$ (кВ/м).

Приведенные результаты позволили определить с вероятностью 0,95 оценку для искомого значения напряженности E_0 , кВ/м: $92,71 \leq E_0 \leq 105,41$.

При тех же значениях доверительной вероятности и числе степеней свободы для определения доверительного интервала для дисперсии определяем из таблиц поправочные коэффициенты w_1 и w_2 [6]:

$$w_1(P, k) = w_1(0,95; 10) = 0,688;$$

$$w_2(P, k) = w_2(0,95; 10) = 1,826;$$

тогда: $sw_1 \leq \sigma \leq sw_2$, $6,12 \leq \sigma \leq 16,23$ с вероятностью 0,95.

Все рассмотренное выше решалось в предположении, что результаты экспериментов распределены по нормальному закону. Для проверки данного предположения был использован способ, основанном на методе моментов [6]. При этом было проведено сравнение величин эмпирических моментов распределения с соответствующими величинами теоретических моментов нормального распределения. Так как моменты первого и второго порядка определяют само нормальное распределение, а с повышением порядка момента резко увеличивается число данных, необходимых для его отыскания с приемлемой точностью, то были учтены только моменты (μ_i) третьего и четвертого порядков.

$$\mu_3 = 0; \quad \mu_4 = 3\sigma^4.$$

Безразмерные величины коэффициент асимметрии и эксцесс определяют следующими соотношениями:

$$\tilde{N}_1 = \frac{m_3}{s^3}; \quad \tilde{A}_\delta = \frac{m_4}{s^4} - 3; \quad (4)$$

где: C_1 – коэффициент асимметрии; E_p – эксцесс.

Для нормального распределения должны выполняться равенства $C_1 = 0$, $E_p = 0$. Значительное отличие эмпирических оценок коэффициента асимметрии и эксцесса от нуля свидетельствуют о непригодности нормального распределения для описания рассматриваемых эмпирических данных. Для упрощения расчетов применялась группировку данных. Вся область изменения результатов измерений была разбита на одинаковые по длине интервалы (шаг). В данном случае число интервалов равно 8. Необходимые данные по выборке представлены в табл.3.

Таблица 3 – Вспомогательные данные для расчета моментов

№	интервал	m	u	mu	mu ²	mu ³	mu ⁴
1	[80; 85)	1	-3,5	-3,5	12,25	-42,87	150,06
2	[85; 90)	0	-2,5	0	0	0	0
3	[90; 95)	2	-1,5	-3	4,5	-6,75	10,25
4	[95; 100)	3	-0,5	-1,5	0,75	-0,375	0,18
5	[100; 105)	2	0,5	1	0,5	0,25	0,125
6	[105; 110)	1	1,5	1,5	2,25	3,375	5,06
7	[110; 115)	0	2,5	0	0	0	0
8	[115; 120]	1	3,5	3,5	12,25	42,87	150,06

В табл. 3 m – число результатов, попавших в интервал.

$$u = \frac{x_c - c_c}{h_c},$$

x_c – середина каждого интервала; c_c – середина всего промежутка измерений; h_c – длина интервала.

Для вычисления эмпирических моментов были использованы известные соотношения [6]:

$$m_3 = \frac{h_c^3}{n} \left[\sum_1^n u_k^3 - 3\bar{u} \sum_1^n u_k^2 + 2(\bar{u})^3 n \right]; \quad (5)$$

$$m_4 = \frac{h_c^4}{n} \left[\sum_1^n u_k^4 - 4\bar{u} \sum_1^n u_k^3 + 6(\bar{u})^2 \sum_1^n u_k^2 - 3(\bar{u})^4 n \right]; \quad (6)$$

где m_3 и m_4 – эмпирические моменты третьего и четвертого порядков соответственно.

При подстановке данных из табл. 3 в соотношения (5) и (6) в результате вычислений были получены для соотношений (4) следующие эмпирические значения: $C_1 = 0,281$; $E_p = 0,207$.

После этого было проверено, не противоречат ли полученные значения коэффициента асимметрии и эксцесса гипотезе о нормальности распределения. Для этого эмпирические значения C_1 , E_p сравнивались соответственно с их средние квадратическими ошибками (стандартом) (7) для коэффициента асимметрии и (8) для эксцесса [6]:

$$s \left(\frac{m_3}{s^3} \right) = \sqrt{\frac{6(n-1)}{(n+1)(n+3)}} = 0,61; \quad (7)$$

$$s \left(\frac{m_4}{s^4} - 3 \right) = \sqrt{\frac{24n(n-2)(n-3)}{(n-1)^2(n+3)(n+5)}} = 0,92. \quad (8)$$

Если эмпирические коэффициент асимметрии или эксцесс превосходят по абсолютной величине свой стандарт, то гипотезу о нормальности распределения отвергают. В описываемом случае, даже для небольшого числа измерений $n = 10$, эмпирические коэффициент асимметрии и эксцесс меньше их стандарта и незначительно отличаются от нуля, что свидетельствует о подтверждении гипотезы о нормальном распределении полученных экспериментальных данных.

Выводы. По результатам исследований можно сделать следующие выводы.

1. В соответствии с требованиями ГОСТ разработана методика обработки экспериментальных результатов по определению стойкости радиоэлектронных компонентов к поражающему воздействию ЭМИ.
2. Данная методика применима не только для задач защиты объектов вооружения, военной техники и критических гражданских объектов от поражающего воздействия ЭМИ, свойственному проявлениям электромагнитного терроризма, но и к любым другим видам ЭМИ естест-

венного и искусственного происхождения.

3. Полученные результаты позволяют сделать вывод о правомочности гипотезы нормального распределения результатов измерений в рассмотренном случае и о корректности полученных экспериментальных данных.

Список литературы: 1. Рикетс Л.У., Бриджес Дж.Э., Майлетта Дж. Электромагнитный импульс и методы защиты. Пер. с англ. – М.: Атомиздат, 1979. – 327 с. 2. Белоус В. Угроза использования ЭМИ-оружия в военных и террористических целях // Ядерный контроль. – № 1 (75), Том 11. – 2005. – С. 133-140. 3. Коробко А.И., Коробко З.И. Реальные уровни стойкости различной радиоэлектронной аппаратуры к воздействию импульсного электромагнитного излучения СВЧ – диапазона // Сборник научных трудов 2-го Международного радиотехнического форума «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития». Харьков. – 2005. – Т. 6. – С. 96. 4. Коробко А.И., Коробко З.И. Математическое статистическое моделирование поведения элементов радиоэлектронной аппаратуры при воздействии сверхмощного электромагнитного излучения // Матеріали XVI міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка технологія, освіта, здоров'я», 4-6 червня 2008 р. Харків: у 2 ч. – Ч. 2. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2008. – С. 351. 5. ГОСТ 24026-80 – Исследовательские испытания. Планирование эксперимента. Термины и определения. 6. Румишский Л.З., Смирнов С.Н. Методы обработки результатов эксперимента. – М.: Из-во Московского института стали и сплавов, 1973. – 162 с. 7. Дворяшин Б.В., Кузнецов Л.И. Радиотехнические измерения. – М.: Советское радио, 1995. – 359 с.

Поступила в редколлегию 16.11.2009

УДК 651.326

В.І.КРАВЧЕНКО, докт.техн.наук, професор, НТУ «ХПІ»;
А.Е.ГОРЮШКІН, аспірант, НТУ «ХПІ»

ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ІМПУЛЬСНОЇ МОДУЛЯЦІЇ ДЛЯ ПОБУДОВИ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧІ З ЧАСОВИМ РОЗДІЛЕННЯМ КАНАЛІВ

Надані пропозиції формування каналних сигналів та вибір виду імпульсної модуляції для побудови систем передачі з часовим поділом каналів. Вибір виду імпульсної модуляції визначає якість функціонування багатоканальних систем передачі, для оцінки якої використовуються різні критерії, який здійснюється на основі порівняння завадостійкості при прийманні АІМ, ШІМ і ФІМ сигналів.

Sentences of creation of channel signals and a choice of sort of impulse modulation for construction of systems of transmission with time sharing of channels are presented. The choice of sort of impulse modulation defines quality of functioning of multi-channel systems of transmission for which estimation different criteria which is carried out on the basis of noise stability matching at reception АІМ, WІМ and PІМ signals are used.

Вступ. Ідея часового розділення каналів (ЧРК) полягає в тім, що елементи первинного сигналу $c_i(t)$, що належить i -му каналу, передаються в інтервалах часу τ_{ki} , що не перекриваються, вільних від сигналів інших каналів, по загальній лінії зв'язку.

Постановка проблеми. Розглянуті питання, пов'язані з особливостями побудови передавального тракту в системах передачі даних з часовим розділенням каналів, у тому числі в цифрових системах передачі. Розглянуто засоби підвищення ефективності функціонування певних елементів схеми передавального тракту цифрових систем передачі.

Аналіз літератури. У літературі, присвяченій телекомунікаційним системам [1,4], дедалі більше уваги приділяється методам розділення каналних сигналів. У роботах [2,7] представлений принцип побудови систем передачі з часовим розділенням каналів. Види імпульсної модуляції для систем з часовим розділенням каналів більш детально розглянуто у [3,5,6].

Мета – розробка пропозицій щодо формування каналних сигналів та вибір виду імпульсної модуляції для побудови систем передачі з часовим розділенням каналів.

У системах передачі з часовим розділенням каналів ЧРК переносниками є періодичні послідовності прямокутних імпульсів, зрушені відносно один одного на величину захисного інтервалу τ_z , параметри яких змінюються за законами зміни первинних сигналів.

Періодична послідовність прямокутних імпульсів (ПППІ) із зазначенням всіх її параметрів наведена на рис. 1.

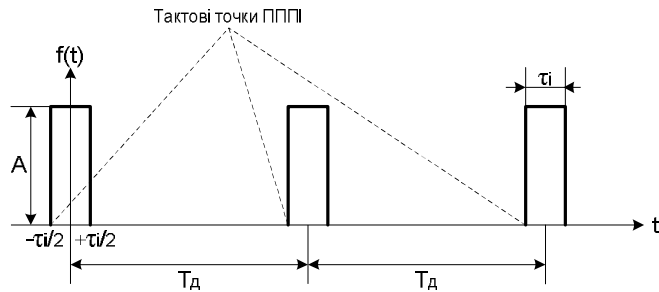


Рисунок 1 – Переносник – періодична послідовність прямокутних імпульсів

Основними параметрами ПППІ є: A – амплітуда імпульсів, τ_i – тривалість імпульсів, T_d – період проходження імпульсів або $F_d = 1/T_d$ – частота проходження чи тактова частота періодичної послідовності імпульсів (кругова частота проходження $\Omega_d = 2\pi F_d$), положення імпульсів щодо тактових точок $t_i = iT_d$, $i = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$, і скважність ПППІ $q = T_d/\tau_i$. У сучасних СП з ЧРК значення скважності знаходиться у межах 20...2500 [2].

Періодичну послідовність прямокутних імпульсів можна представити в аналітичній формі.

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sigma(t - kT_d), \quad (1)$$

де $\sigma(t)$ – функція, що описує поодинокий імпульс вихідної послідовності $f(t)$. Для ПППІ (рис. 1) функція $\sigma(t)$ має вигляд (2).

$$s(t) = \begin{cases} A & \text{при } -\frac{\tau_i}{2} \leq t \leq \frac{\tau_i}{2} \\ 0 & \text{при } t < -\frac{\tau_i}{2}, t > \frac{\tau_i}{2} \end{cases}. \quad (2)$$

З іншого боку, ПППІ $f(t)$ може бути представлена рядом Фур'є.

$$f(t) = A \left[\frac{\tau_i}{T_d} + \frac{2}{p} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(np \frac{\tau_i}{T_d})}{n} \cos(n\Omega_d t) \right], \quad (3)$$

де $\Omega_d = 2\pi F_d$ – кругова частота послідовності $f(t)$.

Як випливає з (3), спектр ПППІ містить у собі постійну складову з амплітудою, рівною $A_0 = A \frac{T_d}{\tau_i} = \frac{A}{q}$ і гармоніки частоти проходження – частоти дискретизації з амплітудами, що наведені у (4).

$$A_{ir} = \frac{2A}{p} \frac{\sin(np \frac{\tau_i}{T_d})}{n} \cos(n\Omega_d t) = \frac{2A}{pn} \sin(\frac{np}{q}) \cos(2npF_d t). \quad (4)$$

Спектр ПППІ наведено на рис. 2.

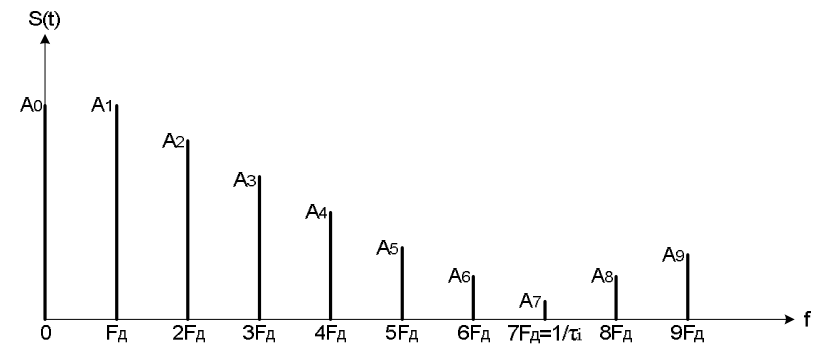


Рисунок 2 – Спектр амплітуд періодичної послідовності прямокутних імпульсів

Відомо, що обвідна спектра амплітуд ПППІ відповідає спектру поодинокого прямокутного імпульсу тривалістю τ_i , а число гармонік тактової частоти (частоти проходження) до першого нуля спектра амплітуд дорівнює $q - 1$, тобто на одиницю менше скважності послідовності імпульсів q . І крім того, більше ніж 90...95 % потужності періодичної послідовності імпульсів зосереджено в смузі

частот від 0 до $F_{\text{макс}} = 1/\tau_i$. Отже, для передачі вихідної ПППП по каналам, трактам і лініям зв'язку їхня смуга частот повинна бути не менше $\Delta F = 1/\tau_i$.

Формування каналних сигналів у СП з ЧРК здійснюються на основі модуляції одного з основних параметрів ПППП. В основному знайшли застосування три види імпульсної модуляції: амплітудно-імпульсна (АІМ), широтно-імпульсна (ШІМ) і часова імпульсна модуляція, різновидами якої є фазоімпульсна модуляція (ФІМ) та частотно-імпульсна модуляція (ЧІМ) [3,6].

Вибір виду імпульсної модуляції визначає якість функціонування багато-каналних систем передачі, для оцінки якої використовуються різні критерії (критерій завадостійкості, критерій використання пропускної спроможності й критерій ефективності). Інтегральним показником якості є критерій завадостійкості. Саме завадостійкість визначає пропускну спроможність і ефективність, під якою розуміється значення питомої мінімальної енергії сигналу, що припадає на одну двійкову одиницю інформації. З погляду передачі не має принципового значення, який вид імпульсної модуляції використати. Тому вибір виду імпульсної модуляції здійснюють на основі порівняння завадостійкості при прийманні АІМ, ШІМ і ФІМ сигналів [1,5].

Для оцінки завадостійкості різних видів імпульсної модуляції зробимо наступні припущення.

До входу приймального пристрою СП з ВРК надходить груповий сигнал $\tilde{S}(t)$, являє собою сукупність каналних сигналів $S(t)$ та завади $n(t)$.

$$\tilde{S}(t) = S(t) + n(t); \quad (5)$$

При цьому основним видом завад є білий шум з енергетичним спектром $G(t) = G_0 = \text{const}$ і з середньою потужністю σ_3^2 .

Максимальне значення корисного сигналу на вході приймального пристрою СП з ВРК дорівнює $A_{\text{макс}}$, що під впливом завади змінюється у певних межах.

На виходах фільтрів нижніх частот каналів утворюються первинні сигнали $\tilde{c}(t)$, які являють собою корисні сигнали $c(t)$ і перетворену заваду $e(t)$.

$$\tilde{c}(t) = c(t) + e(t). \quad (6)$$

Під завадостійкістю сигналів будемо розуміти співвідношення (7).

$$\eta = \frac{W_c}{W_3}, \quad (7)$$

де W_c – потужність корисного сигналу на виході ФНЧ зі смугою пропускання $\Delta F_{\text{НЧ}}$; W_3 – потужність завади на виході ФНЧ.

Завадостійкість АІМ сигналів визначається наступним співвідношенням.

$$\eta_{\text{АІМ}} = \frac{m_a^2}{2} \frac{A_{\text{макс}}^2}{G_0 \Delta F_{\text{НЧ}}} \frac{t_{\text{и}}}{T_{\text{д}}} = \frac{m_a^2 A_{\text{макс}}^2}{2q G_0 \Delta F_{\text{НЧ}}}. \quad (8)$$

Для АІМ $m_a = 1$. Таким чином, максимальне значення завадозахищеності АІМ сигналів не перевищує наступного значення.

$$\eta_{\text{АІМ}} \leq \frac{A_{\text{макс}}^2}{2q G_0 \Delta F_{\text{НЧ}}}. \quad (9)$$

Завадостійкість ШІМ і ФІМ сигналів визначають за формулою.

$$\eta_{\text{ШІМ, ФІМ}} = \frac{1}{2} \frac{A_{\text{макс}}^2}{G_0 \Delta F_{\text{НЧ}}} \frac{t_{\text{и}}}{T_{\text{д}}} \left(\frac{\Delta t_{\text{макс}}}{t_{\phi}} \right)^2 = \frac{A_{\text{макс}}^2}{2q G_0 \Delta F_{\text{НЧ}}} \frac{\Delta t_{\text{макс}}^2}{t_{\phi}^2}; \quad (10)$$

З урахуванням (9) завадостійкість ШІМ і ФІМ сигналів визначають наступним співвідношенням.

$$\eta_{\text{ШІМ, ФІМ}} = \eta_{\text{АІМ}} \frac{\Delta t_{\text{макс}}^2}{t_{\phi}^2}, \quad (11)$$

де m_a – коефіцієнт, що характеризує глибину модуляції; $A_{\text{макс}}$ – максимальне значення корисного сигналу; G_0 – енергетичний спектр завади; $\Delta F_{\text{НЧ}}$ – смуга пропускання; $q = T_{\text{д}}/\tau_i$ – скважність імпульсів каналного сигналу; τ_{ϕ} – тривалість переднього (заднього) фронту імпульсу; $\Delta t_{\text{макс}}$ – максимальне відхилення фронту імпульсу при модуляції [1].

Системи передачі на основі ШІМ і ФІМ мають значно більшу завадостійкість, ніж системи передачі з АІМ, тому що останні виключають можливість застосування обмежників амплітуд у тракті приймання. У зв'язку з цим амплітудно-імпульсна модуляція мало придатна для побудови СП з ЧРК підвищеної завадостійкості. АІМ знаходить застосування як проміжне перетворення при реалізації та демодуляції більш складних видів імпульсної модуляції (ШІМ, ФІМ, ІКМ) або їх інших різновидів, які є комбінаціями класичних видів імпульсної модуляції.

При виборі ШІМ або ФІМ виходять із наступного. При однаковій смузі пропускання лінійного тракту СП з ЧРК і однаковій формі імпульсів завадостійкість ШІМ і ФІМ практично однакова, але при ШІМ спрощується побудова приймального пристрою. З іншого боку, при ШІМ середня потужність сигналу більше, ніж при ФІМ, тому що для забезпечення можливості модуляції імпульсів їх середню тривалість при ШІМ доводиться брати більшою, ніж при ФІМ. При збереженні середньої потужності сигналу, перехід до ФІМ дає можливість збільшити амплітуду імпульсів $A_{\text{макс}}$ і тим самим збільшити відношення сигнал/завада на вході приймального пристрою (10).

Варто також мати на увазі, що при ШІМ ширина смуги пропускання тракту передачі повинна забезпечити досить малі перекручування найкоротших імпульсів і тому виявляється більш широкою, ніж смуга частот, необхідна для передачі імпульсів середньої (немодульованої) тривалості. При ФІМ тривалість всіх імпульсів залишається однаковою, що дозволяє вибрати оптимальну ширину смуги пропускання, що забезпечує максимальну завадостійкість при заданому числі каналів [4,7].

Висновок Завдяки таким перевагам, як енергетичні витрати на передачу

сигналу, завадостійкості (здатності модульованих сигналів протистояти шкідливому впливу перешкод), складності встаткування та ін., рекомендується застосовувати ФІМ при побудові систем передачі з часовим розділенням каналів.

Список літератури. 1. Теоретические основы электросвязи: Учебное пособие / Иванов М.А., Кравец В.А.; Под ред. В.А.Кравца. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2003. – 354 с. 2. Цифровые и аналоговые системы передачи: Учебник для вузов / Иванов В.И., Гордиенко В.М., Попов Г.Н. и др.; Под ред. Иванова В.И. – 2-е изд. – М.: Горячая линия – Телеком, 2003. – 232 с. 3. Телекоммуникационные системы и сети: Учебное пособие. В 3 томах. Том 1 – Современные технологии / Крук Б.И., Попантопуло В.И., Шувалов В.П.; под ред. профессора В.П.Шувалова. – Изд. 3-е, испр. и доп. – М.: Горячая линия – Телеком, 2004. – 647 с. 4. Основы построения телекоммуникационных систем и сетей: Учебник для вузов / Крухмалев В.В., Гордиенко В.М., Моченов А.Д. и др.; Под ред. В.Н.Гордиенко и В.В.Крухмалева. – М.: Горячая линия – Телеком, 2004. – 510 с. 5. Системы электросвязи: Учебник для вузов / Под ред. В.П.Шувалова. – М.: Радио и связь, 1987. – 512 с. 6. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы: Учебник. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 2000. – 462 с. 7. Многоканальные системы передачи. Учебник для вузов / Н.Н.Баева, В.Н.Гордиенко, С.А.Курицын и др.; под ред. Н.Н.Баевой и В.Н.Гордиенко. – М.: Радио и связь, 1997.

Надійшла до редколегії 27.10.2009

УДК 621

Б.И.НЕВЗЛИН, канд.техн.наук, ВНУ им. В.Даля, Луганск;
Н.П.ГОЛОВАЧЕВ, аспирант, ВНУ им. В.Даля, Луганск

РАСЧЕТ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ И ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ПОРИСТОГО МАТЕРИАЛА

Запропонована електрична модель пористого вологого сипкого матеріалу, що враховує форми зв'язку води з сухим матеріалом і адекватно відображає частотну залежність діелектричної проникності і електропровідності в межах 0,5 - 110 МГц. Мал. 4, табл.1, іст 9.

The electronic model of porous, moist, friable material, taking into account the combination of water with dry material, and adequately reflecting the frequency dependence of inductance and conductivity within the limits of 0.5-110 MHz, is offered in Fig. 4, Table 1, Source 9.

Введение. В работе [1] приведены многие известные электрические модели влажных материалов. Как отмечено там же, наиболее существенными недостатками известных моделей являются отсутствие учета форм связи воды с материалом и не зависимость диэлектрической проницаемости (ДП) и электропроводности (Э) от частоты приложенного к материалу электрического поля. Второй недостаток противоречит многочисленным экспериментальным данным, приведенным многими авторами [2-5], в том числе и результатам исследований автора [6].

В последней работе предложена электрическая модель влажного сыпучего материала (СМ) в определенной мере свободная от упомянутых недостатков. В ней СМ представлен состоящим из одинаковых частиц сферической формы в

которых находится вода при невысокой влажности и на поверхности частиц, если влажность превышает пористость. Расчет параметров СМ выполнен цепиполевым методом. Для учета форм связи воды с материалом и частотной зависимости ДП и Э приняты их значения в частице на нулевой и бесконечной частотах.

Не решенная часть проблемы. Модель значительно приближена к реальному СМ, но частотная зависимость параметров выражена в недостаточной мере, в частности, ДП СМ не может быть больше ДП воды, что в реальном СМ при значительной влажности может иметь место [7].

Основной материал исследования. Для устранения этого недостатка сделаем следующее допущение, из числа свойств связанной воды следует указать повышенную плотность. Предположим, что связанная вода находится в наиболее сильной связи (но не химической) образуя двойной мономолекулярный слой с $\epsilon = 4,5$ и плотностью $1,74 \text{ т/м}^3$ [8], при этом она находится на значительной части, если не всей поверхности материала. Плотность связанной воды является постоянной величиной в пределах одного минерального состава, и не зависит от температуры, а определяется энергией связи с гетерогенной поверхностью соответствующей величине слоевого заряда, до температуры структурной неустойчивости. Величина, которой сдвинута в высокотемпературную область по сравнению температурой фазового перехода свободной воды [9]. Вся остальная вода в материале является свободной и сохраняет свои свойства. Конечно, это допущение несколько упрощает общую картину, но зато делает возможным учет форм связи, который в общем случае слишком затруднителен.

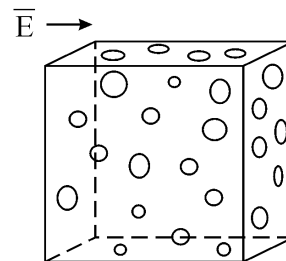


Рисунок 1 – Единичный куб из пористого материала

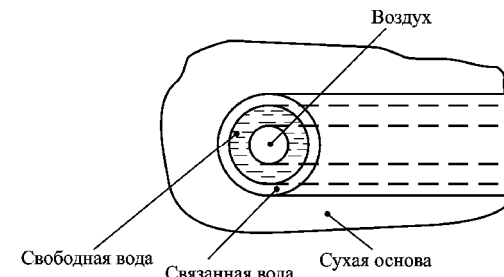


Рисунок 2 – Расположение составляющих в поре материала

Для более подробного рассмотрения представим куб из материала, который содержит сухую основу, воздух, связанную и свободную воду (рис. 1) в сквозных порах. Каждая такая пора включает в общем случае оба вида воды и воздух (рис. 2). Можно считать, что одна треть пор расположены по направлению вектора электрического поля и две трети – нормально к нему. То есть одна треть сухого мате-

риала, связанной и свободной воды и воздуха включены параллельно и две трети – последовательно, что отражается схемой замещения на рис. 3, где C_{1cx} , g_{1cx} емкость и проводимость сухого материала (основы) в последовательном включении; C_{1cv} , g_{1cv} – то же для связанной воды; $C_{1в}$, $g_{1в}$ – для свободной воды; $C_{1вз}$, $g_{1вз}$ – для воздуха в порах; индекс 2 при C , g относится к параллельному включению.

Обозначив относительную порозность материала J для куба единичного размера можно записать

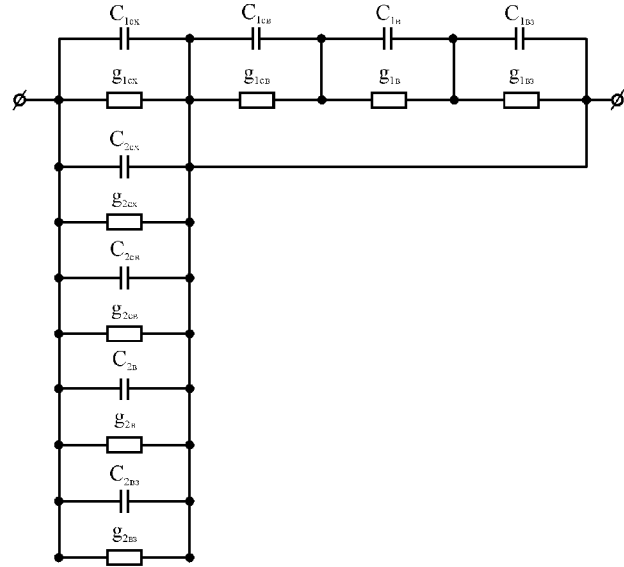


Рисунок 3 – Схема замещения пористого материала

$$\begin{aligned} C_{1cx} &= \frac{2e_o e_c (1-J)^{2/3}}{3(1-J)^{1/3}} = \frac{2e_o e_c (1-J)^{1/3}}{3}; \\ g_{1cx} &= \frac{2g_c (1-J)^{1/3}}{3}; \\ C_{2cx} &= \frac{e_o e_c (1-J)}{3}, \quad g_{2cx} = \frac{g_c (1-J)}{3}. \end{aligned} \quad (1)$$

По остальным элементам:

$$\begin{aligned} C_{1c\bar{a}} &= \frac{2e_o e_{c\bar{a}} (1-J)^{2/3}}{3(1-(1-J_{\bar{a}}))^{1/3}}; & C_{2c\bar{a}} &= \frac{e_o e_{c\bar{a}} J_{\bar{a}}}{3}; \\ g_{1c\bar{a}} &= \frac{2g_{c\bar{a}} (1-J)^{2/3}}{3(1-(1-J_{\bar{a}}))^{1/3}}; & g_{2c\bar{a}} &= \frac{g_{c\bar{a}} J_{\bar{a}}}{3}; \\ C_{1\bar{a}} &= \frac{2e_o e_{\bar{a}} (1-J)^{2/3}}{3(1-(1-J_i + J_{\bar{a}}))^{1/3}}; & C_{2\bar{a}} &= \frac{e_o e_{\bar{a}} (J_i - J_{\bar{a}})}{3}; \\ g_{1\bar{a}} &= \frac{2g_{\bar{a}} (1-J)^{2/3}}{3(1-(1-J_i + J_{\bar{a}}))^{1/3}}; & g_{2\bar{a}} &= \frac{g_{\bar{a}} (J_i - J_{\bar{a}})}{3}; \\ C_{1\bar{a}\zeta} &= \frac{2e_o (1-J)^{2/3}}{3(1-(1-J + J_i))^{1/3}}; & C_{2\bar{a}\zeta} &= \frac{e_o (J - J_i)}{3}, \end{aligned} \quad (2)$$

где J_o – объемная влажность; J_{cv} – объемное содержание связанной воды, равное $W_{связ}/1,74$ – плотность связанной воды. Проводимость воздуха считаем равной нулю $g_{1вз} = g_{2вз} = 0$. Переходя от C и g к e и g (так как куб единичный)

$$\begin{aligned} e_{1\bar{n}\bar{o}} &= \frac{2e_{\bar{n}} (1-J)^{1/3}}{3}; & e_{1\bar{n}\bar{a}} &= \frac{e_{\bar{n}\bar{a}} J_{\bar{n}\bar{a}}}{3}; \\ e_{1\bar{a}} &= \frac{2e_{\bar{a}} (1-J)^{2/3}}{3(1-(1-J_o + J_{\bar{n}\bar{a}}))^{1/3}}; & e_{1\bar{a}} &= \frac{2(1-J)^{2/3}}{3(1-(1-J + J_o))^{1/3}}; \\ e_{2\bar{n}\bar{o}} &= \frac{e_{\bar{n}} (1-J)}{3}; & e_{2\bar{n}\bar{a}} &= \frac{e_{\bar{n}\bar{a}} J_{\bar{n}\bar{a}}}{3}; & e_{2\bar{a}} &= \frac{e_{\bar{a}} (J_i - J_{\bar{n}\bar{a}})}{3}; \\ e_{2\bar{a}\zeta} &= \frac{J - J_i}{3}; & g_{1\bar{n}\bar{o}} &= \frac{2g_{\bar{n}} (1-J)^{1/3}}{3}; & g_{1\bar{n}\bar{a}} &= \frac{g_{\bar{n}\bar{a}} (1-J)^{2/3}}{3(1-(1-J_{\bar{n}\bar{a}}))^{1/3}}; \\ g_{1\bar{a}} &= \frac{2g_{\bar{a}} (1-J)^{2/3}}{3(1-(1-J_o + J_{\bar{n}\bar{a}}))^{1/3}}; & g_{2\bar{n}\bar{o}} &= \frac{g_{\bar{n}} (1-J)}{3}; & g_{2\bar{n}\bar{a}} &= \frac{g_{\bar{n}\bar{a}} J_{\bar{n}\bar{a}}}{3}; \\ g_{2\bar{a}} &= \frac{g_{\bar{a}} (J_i - J_{\bar{n}\bar{a}})}{3}. \end{aligned} \quad (3)$$

Преобразуя схему замещения к виду, показанному на рис. 4, находим

$$\begin{aligned} e_2 &= e_{2\bar{n}\bar{o}} + e_{2\bar{n}\bar{a}} + e_{2\bar{a}} + e_{2\bar{a}\zeta}; \\ g_2 &= g_{2\bar{n}\bar{o}} + g_{2\bar{n}\bar{a}} + g_{2\bar{a}}; \\ r_3 &= \frac{g_{1\bar{n}\bar{o}}}{g_{1\bar{n}\bar{o}}^2 + (we_i e_{1\bar{n}\bar{o}})^2} + \frac{g_{1\bar{n}\bar{a}}}{g_{1\bar{n}\bar{a}}^2 + (we_i e_{1\bar{n}\bar{a}})^2} + \frac{g_{1\bar{a}}}{g_{1\bar{a}}^2 + (we_i e_{1\bar{a}})^2}; \\ a_3 &= \frac{e_{1\bar{n}\bar{o}}}{g_{1\bar{n}\bar{o}}^2 + (we_i e_{1\bar{n}\bar{o}})^2} + \frac{e_{1\bar{n}\bar{a}}}{g_{1\bar{n}\bar{a}}^2 + (we_i e_{1\bar{n}\bar{a}})^2} + \frac{e_{1\bar{a}}}{g_{1\bar{a}}^2 + (we_i e_{1\bar{a}})^2} + \frac{1}{(we_i)^2}. \end{aligned} \quad (4)$$

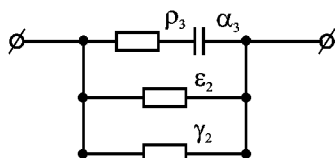


Рисунок 4 – Последовательно-параллельная схема замещения материала частицы

Из последних формул получаем ДП и электропроводность материала частицы на любой из исследованного диапазона частот, то есть при известных значениях ϵ и γ сухой основы, связанной и свободной воды:

$$e_i = e_2 + \frac{a_3}{\left(\frac{a_3}{we_i}\right)^2 + r_3^2}; \quad g_i = g_2 + \frac{r_3}{\left(\frac{a_3}{we_i}\right)^2 + r_3^2}. \quad (5)$$

Произведем расчет локальных C_1 , C_2 , g_1 , g_2 и интегральных параметров, используя выражения (1)-(5). Для СМ типа угольной шихты для коксования углеподготовительного цеха №1 Авдеевского коксохимзавода влажностью 5 % зольностью 7,8 %, увлажненного водой содержащей 0,5 % NaCl с исходными данными: радиус частицы – 0,5 мм, радиус площадки контактирования между частицами – 20 мкм, высота микронеровностей – 20 мкм, результаты расчетов приведены в таблице.

Среднеквадратичная относительная приведенная погрешность модели построенной по [6] составила более 20 %, что трудно считать удовлетворительным.

f, МГц	C1, пФ	C2, пФ				g1, C _{им}	g2, C _{им}	C _{им} /м		
0,50	602	126	12,4	12,4	0,00	0,0187	0,00170	1,56	1,66	-0,10
1,6	189	88,0	8,47	7,11	1,36	0,0206	0,00188	1,74	1,86	-0,12
5,1	60,8	76,3	7,16	5,43	1,73	0,0212	0,00194	1,96	2,24	-0,28
17	45,3	74,7	6,17	4,32	1,85	0,0213	0,00204	3,41	3,31	0,10
44	43,9	73,7	4,37	3,57	0,81	0,0213	0,00248	6,45	5,62	0,77
110	43,7	71,7	3,33	3,25	0,08	0,0213	0,00352	8,23	8,81	-0,58
Среднеквадратичная относительная приведенная погрешность					0,098					0,047

Вывод. Описанная в работе модель отражает частотную зависимость ДП и Э влажного СМ в диапазоне 0,5-110 МГц со среднеквадратичной относительной приведенной погрешностью до 5 – 10 %, что сравнимо с погрешностью измерений (5 – 7 %).

Список литературы: 1. Невзлин Б.И. О электрических моделях влажных материалов // Праці Луганського відділення Міжнародної Академії інформатизації. – 2003. – № 2 (7). – С. 45-51. 2. Секанов Ю.П. Научные и технические решения проблемы влагометрии зерна и кормов в процессе их производства: Дис...докт. техн. наук: 05.20.01.05.13.17. – М, 2000. – 76 с. 3. Берлинер М.А. Измерения влажности. – М.: Энергия, 1973. – 400 с. 4. Теория и практика экспрессного контроля влажности твердых и жидких материалов / Е.С.Кричевский, В.К.Бензарь, М.В.Венидиктов и др. / Под ред. Е.С.Кричевского. – М.: Энергия, 1980. – 240 с. 5. Федоткин И.М., Ключков В.М. Физико-технические основы влагометрии в пищевой промышленности. – К.: Техніка, 1974. – 308 с. 6. Дубров Н.С., Кричевский Е.С., Невзлин Б.И. Многопараметрические влагомеры для сыпучих материалов. – М.: Машиностроение, 1980. – 144 с. 7. Исследование, разработка и внедрение системы контроля влажности угольной шихты в лабораторных и производственных условиях. Отчет о НИР (заключ.) / Ворошиловградский машиностр. ин-т. – Э-146-79; №ГР 79010671; Инв. № Б 929909. – Ворошиловград, 1980. – 225 с. 8. Лыков А.В. Теория сушки. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1950. – 416 с. 9. Макеева Т.Г., Гончарова Л.В., Трофимов В.А., Егоров Ю.М. Природа и закономерности изменения плотности связанной воды в дисперсных системах. <http://geo.web.ru>.

Поступила в редакцию 16.10.2009

О.С.НЕДЗЕЛЬСКИЙ, зав.отделом, НТУ «ХПИ»;

А.В.ПЛИЧКО, млад.науч.сотр., НТУ «ХПИ»;

Е.Г.ПОНУЖДАЕВА, зав.сектором, НТУ «ХПИ»

ГЕНЕРАТОР ИМПУЛЬСОВ ТОКА КОСВЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ МОЛНИИ ФОРМЫ «МНОЖЕСТВЕННЫЙ УДАР» ГИТ-MS

Генератор імпульсів струму непрямої дії блискавки форми «Множинний удар» ГИТ-MS. Подані результати схемно-технічної та конструктивної розробки генератора імпульсів струму форми «Множинний удар» штучної блискавки з енергією, що накопичується, 300 кДж та вихідною напругою 80 кВ.

Pulse current generator of the indirect effects of «multiple stroke» current form GIT-MS. The results of the circuit-technical and rational design of the indirect effects of «multiple stroke» current form of artificial lightning with 300 kJ stored up energy and 80 kV output voltage are presented.

Введение. Надежность объектов аэрокосмической техники во многом зависит от стойкости радиотехнического и радиоэлектронного оборудования к воздействию поражающих факторов, вызванных прямым попаданием грозового разряда (молнии) в корпус летательного аппарата (ЛА). При этом рассматриваются как факторы прямого воздействия импульсного тока молнии (электротермический, электродинамический, акустический и др.), так и косвенного воздействия, обусловленного электромагнитными процессами при растекании импульсного тока по проводящим элементам обшивки ЛА.

Для определения электромагнитной стойкости (ЭМС) электронного и электротехнического оборудования ЛА международные нормативные документы [1-4] предполагают проведение комплекса испытаний с физическим моделированием реальных процессов, соответствующих электромагнитному воздействию импульса тока молнии. Одним из испытаний является воздействие на ЛА серии импульсов тока «Множественный удар» (Multiple Stroke). Эта форма воздействия на амплитудно-временной диаграмме представлена в виде серии из 14 последовательных импульсов тока аperiодической формы (рис. 1).

В соответствии со среднестатистическими параметрами импульсного тока молнии амплитуда первого импульса (импульс D) может достигать 100 кА, а последующих 13 импульсов (импульсы D/2) – 50 кА. Однако, при имитации воздействия указанной серии импульсов MS на ЛА рекомендуется использовать амплитуды импульсов (импульс D) от 1 до 20 кА [2].

Временные характеристики импульсов D и D/2 одинаковы и описываются выражениями:

$$i(t) = I_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}), \quad (1)$$

где $\alpha = 22708 \text{ (с}^{-1}\text{)}$; $\beta = 1294530 \text{ (с}^{-1}\text{)}$, что соответствует фронту импульса $t_{\text{ф}} = 1,5 \text{ мкс.}$ и длительности импульса $t_{\text{и}} = 1,34 \text{ мкс.}$ [1]

Цель работы. Целью работы является схемно-конструктивная разработка

генератора импульсов тока формы MS (ГИТ-MS) для испытания крупногабаритных фрагментов, моделей и объектов аэрокосмической техники.

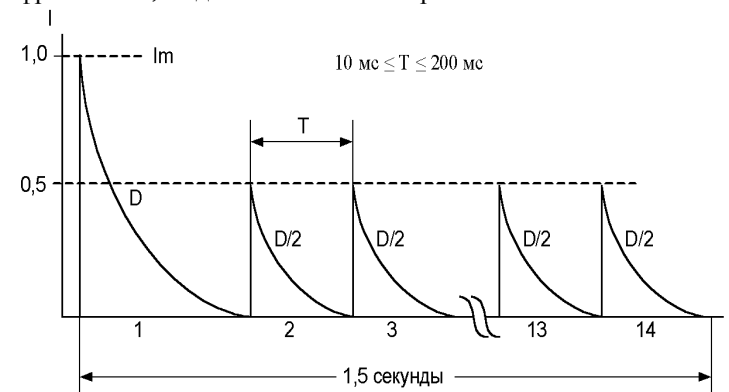


Рисунок 1 – Амплитудно-временная диаграмма импульсов тока формы «Множественный удар» (MS)

Постановка задачи. Основой разработки ГИТ-MS является выработка критериев электрофизических параметров модели испытываемого объекта (ИО). При этом учитываются методические указания нормативных документов [2], согласно которым имитируемая серия импульсов тока подается непосредственным контактом ГИТ-MS с проводящим корпусом ИО (например в носовую часть корпуса самолета, ракеты или их макетов, фрагментов). Для обеспечения растекания тока по проводящей оболочке ИО, соответствующей реальным условиям, необходима определенная геометрия токопроводов, обеспечивающих замкнутый контур ГИТ-MS, соответствующая реальным электромагнитным процессам внутри проводящей оболочки.

В общем случае электрическая цепь импульсного тока ГИТ-MS, включающая в себя проводящую оболочку ИО (прямой токопровод) и обратный токопровод, представима как активно-индуктивная цепь (R-L цепь), параметры которой (активное сопротивление R и индуктивность L) зависят от ряда факторов: геометрических размеров ИО, проводимости оболочки, взаимного расположения ИО и обратного токопровода, их конструкции, конфигурации и др. В свою очередь, взаимное расположение прямого и обратного токопроводов разрядной цепи ГИТ-MS определяет ряд параметров генератора, в частности максимальное напряжение импульсного разряда, при котором исключается пробой воздушного промежутка между прямым и обратным токопроводами.

Исходя из вышеизложенного, основой для постановки задачи разработки ГИТ-MS являются:

- геометрические и электрофизические параметры ИО;
- максимальные амплитуды I_m импульсов тока.

В результате анализа возможных вариантов электрофизической модели

ИО приняты следующие характеристики:

– модель ИО представляет собой цилиндрический объект, выполненный в виде трубы из проводящего материала (например, дюралюминий). Толщина оболочки $\delta = 2$ мм. По торцам цилиндрическая труба имеет «заглушки», выполненные из того же материала. Импульс тока ГИТ-MS подается в центр передней «заглушки» непосредственным контактом цепей разрядного контура и, растекаясь по оболочке ИО, уходит в обратный токопровод контура тока, подключаемый к задней «заглушке» цилиндрической модели ИО. Обратный токопровод представляет собой систему проводников, аксиально охватывающих цилиндр ИО, размещенных вдоль образующих поверхность цилиндра на равном расстоянии от нее (см. рис. 2). Количество проводников обратного токопровода (ОТ) принимается достаточно большим, чтобы в расчетной модели систему ИО-ОТ рассматривать как систему двух коаксиальных проводящих цилиндров с диаметрами D_1 (ИО) и D_2 (ОТ). Диаметр D_1 в расчетной модели ИО принят равным 4 м, что соответствует реальным габаритным размерам. Диаметр D_2 принят равным 6 м, что обеспечивает достаточную электрическую прочность воздушного промежутка ИО – ОТ. Для расширения функциональных возможностей ГИТ-MS длина модели l варьируется в пределах от 0,5 м до 50 м.

Расчетная часть. Принятые электрофизические параметры модели ИО позволяют при расчетах электрических параметров цепи ГИТ – MS – ИО представлять ИО как последовательную R-L цепь, образованную коаксиальной проводящей системой ИО – ОТ. Проведенные расчеты дали следующие результаты: погонная индуктивность системы ИО – ОТ составляет $L_{\text{пог}} \approx 0,08$ мкГн/м (без учета краевых эффектов). Погонное сопротивление $R_{\text{пог}} = 4,8$ мкОм/м. Таким образом, индуктивность цепи нагрузки ГИТ – MS в указанных пределах изменения длины модели ИО l от 0,5 м до 50 м будет принимать значение от 0,4 мкГн до 4 мкГн. Величина $R_{\text{пог}}$ достаточно мала и, как будет показано в последующих расчетах, не играет существенной роли в выборе активного сопротивления разрядных цепей ГИТ – MS.

В результате предварительной проработки возможных схемно-конструктивных решений ГИТ-MS была принята схема, в которой источниками 14-ти импульсов является 14 генераторов импульсов тока (ГИТ), каждый из которых включается на R-L нагрузку (модель ИО) в заданный момент времени и воспроизводит один из нормированных импульсов (D или D/2) тока (см. рис. 1). Аналогичное техническое решение описано в [5].

Разрядный контур каждого из 14 ГИТ выполнен по схеме R-L-C цепи с емкостным накопителем энергии (ЕНЭ), подключаемой к нагрузке (ИО) посредством управляемого искрового разрядника в заданный момент времени. Расчетная электрическая схема разрядных цепей ГИТ – MS представлена на рис. 2.

Как было указано выше, временные характеристики каждого из 14 им-

пульсов одинаковы ($t_{\phi} = 1,5$ мкс, $t_n = 34,5$ мкс); при этом $t_n/t_{\phi} \gg 10$, что позволяет с достаточной точностью использовать расчетные соотношения, следующие из анализа формулы (1):

$$t_{\phi} = K_1 L/R; \quad t_n = K_2 RC; \quad I_m = K_3 U/R, \quad (2)$$

где K_1, K_2, K_3 – постоянные коэффициенты: $K_1 = 2,0; K_2 = 0,75; K_3 = 0,91$.

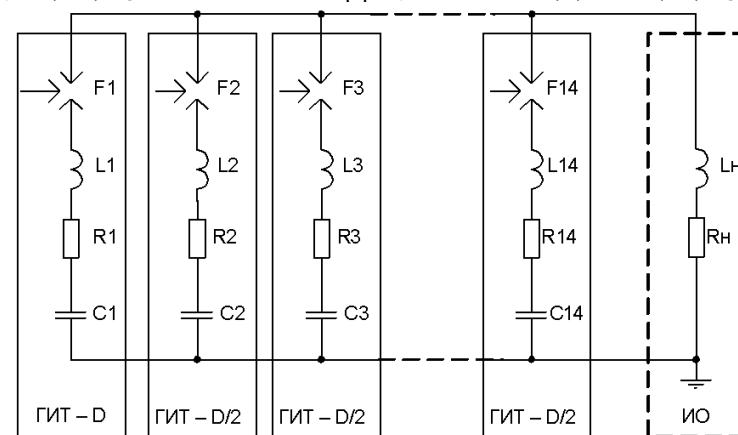


Рисунок 2 – Электрическая схема разрядных цепей ГИТ-MS.

C1 – C14, L1 – L14, R1 – R14 – соответственно емкость, индуктивность и активное сопротивление ГИТов; F1 – F14 – управляемые разрядники ГИТов; Lн, Rн – индуктивность и активное сопротивление нагрузки (эквивалентные параметры ИО)

В табл. 1 приведены расчетные значения параметров схемы ГИТ-D (рис. 2) для дискретного ряда геометрических параметров нагрузки (длина l ИО).

Таблица 1

Длина модели ИО, l , м	5,0	10,0	15,0	20,0	30,0	40,0	50,0
C1, мкФ	14,2	14,2	14,2	11,8	8,8	6,0	5,0
L1, мкГн	1,9	1,4	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
R1, Ом	3,2	3,2	3,2	3,9	5,2	6,5	7,9
Lн, мкГн	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	5,0

Учитывая, что временные параметры импульсов D и D/2 одинаковы, значения C1, L1, R1 такие же как и значения соответствующих параметров ГИТ-D/2. При расчете использовались соотношения (2). Величина $L1=0,9$ мкГн является минимальной расчетной величиной, определяемой конструкцией ГИТ-D (индуктивностью элементов, токопроводов и др.).

Амплитуда I_m ГИТ-D определяется напряжением заряда C1, что, в свою очередь, определяет выбор элементной базы ЕНЭ и его энергетику.

При выборе амплитуды тока ГИТ-D принято решение реализовать максимальную рекомендованную амплитуду [2] $I_m = 20$ кА. Предварительный ана-

лиз показал, что такое значение I_m может быть реализовано при зарядном напряжении ЕНЭ ГИТ-D $U_z = 80$ кВ. Соответственно, зарядные напряжения 13-ти ЕНЭ ГИТ-D/2 для получения импульса тока с амплитудой 10 кА должно быть 40 кВ (при этом R-L-C параметры ГИТ-D/2 соответствуют приведенным в табл. 2 для ГИТ-D). В табл. 2 представлены значения амплитуд токов ГИТ-D и ГИТ-D/2 для различных размеров l модели ИО.

Таблица 2

Длина модели ИО, l , м	5,0	10,0	15,0	20,0	30,0	40,0	50,0
I_m ГИТ-D, кА	22,7	22,7	22,7	18,9	14,0	11,1	9,2
I_m ГИТ-D/2, кА	11,4	11,4	11,4	9,4	7,0	10,5	4,6

Конструкция. Конструкция ГИТ – MS определяется принятым схемным решением (см. рис. 2) и выбором элементной базы, в частности – конденсаторов ЕНЭ. Как было отмечено выше, зарядное напряжение конденсаторов ЕНЭ ГИТ-D $U_z = 80$ кВ. Целесообразно использовать конденсаторы с номинальным напряжением 100 кВ, например, ИК1-100-0,4 УХЛ4 (производство России, г. Серпухов). При максимальной емкости ЕНЭ 14,2 мкФ (см. табл. 1) необходимо 36 шт. параллельно включенных по цепи разряда конденсаторов.

При зарядном напряжении ЕНЭ ГИТ-D/2 $U_z = 40$ кВ целесообразно использовать конденсаторы с номинальным напряжением 50 кВ, например конденсаторы ИК-50-3 УХЛ4. При максимальной емкости ЕНЭ 14,2 мкФ потребуется по 5 конденсаторов на каждый из 13-ти ГИТ-D/2.

Промежуточные значения емкостей, указанные в табл. 1 для различных значений длины модели ИО, реализуются путем включения в работу части конденсаторов каждого ЕНЭ. При этом величины L и R контура ГИТ подбирается соответствующим образом для достижения требуемых временных характеристик импульса тока.

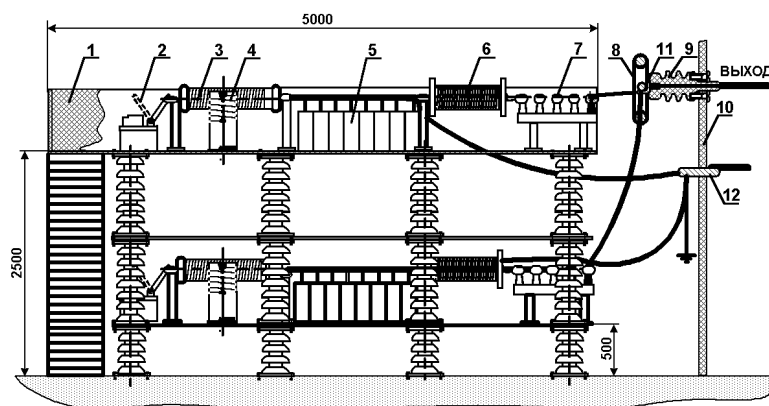


Рисунок 3 – Размещение оборудования ЕНЭ ГИТ-MS.

1 – ограждение, 2 – короткозамыкатель электромеханический, 3 – резистор разрядный, 4 – резистор зарядный, 5 – конденсаторы ЕНЭ, 6 – R-L элемент формирующий, 7 – разрядник многоазорный, 8 – экран, 9 – изолятор проходной, 10 – стена здания, 11 – коллектор ввода тока К1, 12 – коллектор обратного токопровода К2

Элементы ГИТ – MS размещаются на двухъярусной изоляционной несущей конструкции; размеры яруса (в плане) 7000х5000 мм. На верхнем ярусе размещены элементы 6-ти ГИТ-D/2 и половина батареи конденсаторов ЕНЭ ГИТ-D. На нижнем ярусе размещены элементы 7-ми ГИТ-D/2 и вторая половина батареи конденсаторов ЕНЭ ГИТ-D. Размещение элементов ГИТ – MS (конденсаторов ЕНЭ, формирующих R-L элементов, зарядных и разрядных резисторов, разрядников, токопроводов) обеспечивает доступ обслуживающего персонала к любому элементу при производстве монтажа, ремонта и регламентных работ. На рис. 3 представлено размещение оборудования ГИТ – MS на двухъярусной несущей конструкции.

Испытываемый объект подключается к коллектору ввода тока К1; аксиальная система проводников обратного токопровода подключается к коллектору К2. На рис. 4 показан вариант подключения ИО к системе прямого и обратного токопроводов разрядного контура ГИТ – MS.

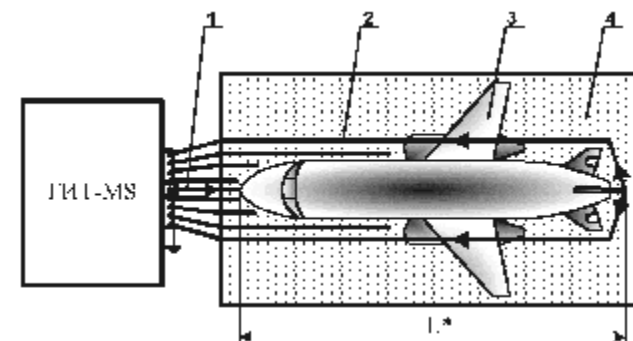


Рисунок 4 – Подключение испытываемого объекта к токопроводам ГИТ-MS.

1 – токопровод ввода тока, 2 – проводники обратного токопровода, 3 – испытываемый объект, 4 – испытательная площадка, L^* – длина испытываемого объекта

Требуемый режим работы ГИТ – MS обеспечивается системой управления (СУ), с помощью которой оператор задает величины зарядных напряжений ЕНЭ, последовательность срабатывания управляемых разрядников и временные интервалы между импульсами.

Выводы.

Разработано схемно-конструктивное решение генератора импульсов тока молнии формы «Множественный удар», предназначенного для нормативных испытаний крупногабаритных объектов (моделей, фрагментов) аэрокосмиче-

ской техники.

Проведены расчеты, подтверждающие соответствие амплитудно-временных параметров импульсов тока заданным техническим требованиям.

Представленные материалы будут использованы в разработках коммерческих проектов.

Список литературы: 1. SAE ARP 5412/ED – 84 Нормативный документ «Рекомендуемая практика авиационно-космических работ. Идеализированные составляющие внешнего тока». США, 1985 г. 2. SAE ARP 5416/ED – 84 Нормативный документ «Рекомендуемая практика авиационно-космических работ. Условия воздействия молнии на летательные аппараты и соответствующие формы испытательных сигналов». США, 1997 г. 3. MIL – STD – 464. Нормативный документ Министерства обороны. «Стандарт для поверхности. Влияние электромагнитной обстановки. Требования к системам». США, 1997 г. 4. KT-160D Квалификационные требования «Условия эксплуатации и окружающей среды для бортового авиационного оборудования. Требования нормы и методы испытаний. Раздел 22.0 Восприимчивость к переходным процессам, вызванным молнией». 5. Патент РФ 2110885 Устройство для имитации токов молнии.

Поступила в редколлегию 10.11.2009.

УДК 629.735.05

И.И.ОБОД, докт.техн.наук, профессор, НТУ «ХПИ»;

Х.САЙЕД АХМАД, студент, НТУ «ХПИ»;

Р.БУТА НАНА, студент, НТУ «ХПИ»

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ СЕТЕЙ РАДИОДОСТУПА ПРИ ДЕЙСТВИИ ПОМЕХ

Наведено переваги мереж радіодоступу щодо передачі інформації та класифікація методів підвищення пропускної здатності мереж радіодоступу при дії завад. Приведено дослідження багатоканального (по частоті) методу підвищення пропускної здатності мереж радіодоступу. Результати розрахунку пропускної спроможності мережі з двома частотними каналами показали збільшення максимальної пропускної спроможності мережі більш ніж вдвоє.

Lead dignities of radioaccess networks for passing to information and methods classification of radioaccess network bandwidth increase is pointed at the noise action. Research over of multichannel (on frequency) method of radioaccess network bandwidth increase is brought. The results of calculation of network bandwidth with two frequency channels showed multiplying the maximal network bandwidth more them twice.

Постановка проблемы и анализ литературы. В последние годы сети радиодоступа (СРД) становятся одним из основных направлений развития сетевой индустрии [1-3]. Бурное развитие сетей этого класса во всем мире, о котором многие говорят как о беспроводной революции в области сетей передачи информации, объясняется наличием целого ряда присущих им достоинств. К ним относятся:

- гибкость архитектуры сети, когда обеспечивается возможность динамического изменения топологии сети при подключении, передвижении и отключении мобильных пользователей без значительных потерь времени;
- высокая скорость передачи информации;
- быстрота проектирования и реализации, что критично при жестких требованиях к времени построения сети;
- высокая степень защиты от несанкционированного доступа;
- отказ от дорогостоящей прокладки или аренды оптоволоконного или медного кабеля.

В настоящее время СРД обеспечивают эффективное решение следующих задач:

- обеспечение мобильного беспроводного доступа к ресурсам Internet;
- организация беспроводной радиосвязи между рабочими станциями локальной сети (организация беспроводного доступа к ресурсам локальной сети);
- объединение удаленных локальных вычислительных сетей и рабочих станций в единую сеть передачи данных и реализация удаленного стационарного доступа локальных сетей пользователей к Internet;
- решение проблемы «последней мили»;
- соединение АТС между собой беспроводными каналами;
- создание территориальных сотовых радиомодемных сетей передачи данных.

Указанные достоинства беспроводных технологий в значительной мере определяются тем, что в основе СРД лежит технология широкополосного или шумоподобного сигнала (ШПС).

Цель работы. Оценка возможностей повышения пропускной способности сетей радиодоступа.

Основной раздел. Суммарная пропускная способность СРД зависит от количества используемых частотных присвоений, способа распределения частотно-территориального ресурса, возможностей повторного использования частотных каналов, условий распространения радиоволн, помеховой обстановки и других, уже перечисленных выше, факторов:

$$C_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{N_b} \sum_{j=1}^{N_c} C_{ij} \left(N_k, \mathbf{\bar{P}}_{dost}, \mathbf{\bar{P}}_{dypl}, K_{povt} \right), \quad (1)$$

где N_b – количество базовых станций в сети; N_c – количество секторов на одну базовую станцию; N_k – число каналов на одну базовую станцию (сектор); C_{ij} – пропускная способность на один сектор; $\mathbf{\bar{P}}_{dost}$ – вектор параметров протокола доступа к каналам; $\mathbf{\bar{P}}_{dypl}$ – вектор параметров дуплексного разделения ка-

налов; K_{povt} – коэффициент повторного использования частот.

В каждом конкретном случае сети РД расчет пропускной способности (1) требует учета топологии сети, особенностей рельефа местности, типа застройки, особенностей распространения радиоволн, энергетических соотношений сигналов и помех, расположения абонентов и т.д.

Исходя из вышеизложенного, можно предложить следующую классификацию возможных методов повышения пропускной способности сетей радиодоступа:

- оптимизации пропускной способности системы радиодоступа;
- оптимизации количества базовых станций в сети;
- оптимизации количества секторов на одну базовую станцию;
- оптимизации числа каналов на одну базовую станцию (сектор);
- оптимизации пропускной способности на один сектор;
- оптимизации вектора параметров протокола доступа к каналам;
- оптимизации вектора параметров дуплексного разделения каналов;
- оптимизации коэффициента повторного использования частот;
- многоканальная работа в сети.

Остановимся более подробно на возможности повышения пропускной способности СРД на основе многоканальной работы, для чего проведем оценку максимальной производительности mesh-сети заданной топологии при оптимальной маршрутизации.

Пусть интенсивность нисходящего трафика для каждого из оконечных устройств пропорциональна скорости генерации данных этим устройством: $\lambda_{down} = k \lambda_{np}$. Тогда пропускная способность восходящего трафика $C_{np} = N \lambda_{np}$, пропускная способность нисходящего трафика сети $C_{np} = N \lambda_{down} = kN \lambda_{np}$ и общая пропускная способность $C = (k + 1)N \lambda_{np}$, где N – число оконечных устройств. Базовая станция каждого кластера i сама является передающей, и если $C_{down}^{(i)}$ – обеспечиваемая для нее пропускная способность, то $\lambda_{down} = C_{down}^{(i)} / N_i$, где N_i – число оконечных устройств, трафик которых проходит через данный кластер, то есть $N_i = \sum_j m_{ij}$, где m_i – число оконечных устройств, трафик кото-

рых проходит через данный терминал. Пусть P_{down} – вероятность начала j передачи базовой станцией данного кластера (далее номера кластеров для удобства записи опущены). Тогда:

- слот является пустым с длительностью σ с вероятностью

$$P_e = (1 - P_{down}) \prod_j (1 - P_{nj});$$

- в нем ведется успешная передача терминалом j и базовой станцией соответственно с вероятностями

$$P_{sj} = P_{nj} (1 - P_{down}) \prod_{v \neq j} (1 - P_{nv}) \quad (2)$$

и

$$P_{sdown} = P_{down} \prod_j (1 - P_{nj});$$

- или происходит коллизия с вероятностью

$$P_c = 1 - P_e \sum_j P_{sj} - P_{sdown}.$$

Следовательно,

$$C_j = 8 \frac{P_{sj} n_p}{T_{slot}}; \quad C_{down} = 8 \frac{P_{sdown} n_p}{T_{slot}}, \quad (3)$$

$$\text{где } T_{slot} = P_e \sigma + (T_d + SIFS + t_{ask} + DIFS) \left(\sum_j P_{sj} + P_{down} \right) + P_c (T_d + EIFS), \quad n_p$$

– размер пакета в байтах, $SIFS$, $DIFS$, $EIFS$ – межкадровые промежутки, определяемые протоколом обмена, T_d и t_{ask} – времена передачи кадра данных и кадра подтверждения.

Рассмотрим случай, когда в насыщении работает некоторый терминал j^* . Вероятность P_{j^*} , начала передачи этим терминалом определяется как

$$P_{j^*} = (1 - P_{down}) \prod_{j \neq j^*} (1 - P_{nj}). \quad (4)$$

Вероятности начала передачи другими терминалами находятся как

$$P_{nj} = \frac{1}{1 + \frac{m_{j^*}}{m_j} \frac{1 - P_{nj^*}}{P_{nj^*}}}, \quad (5)$$

а для базовой станции, учитывая, что $C_{down}/N = kC_j/m_j$, как:

$$P_{down} = \frac{1}{1 + \frac{m_{j^*}}{kN} \frac{1 - P_{nj^*}}{P_{nj^*}}}.$$

Таким образом, учитывая (5), (4) преобразуется к виду:

$$P_{j^*} = 1 - \left[\left(1 + \frac{kN}{m_{j^*}} \frac{P_{nj^*}}{1 - P_{nj^*}} \right) \times \left(\prod_{j \neq j^*} \frac{m_j}{m_{j^*}} \frac{P_{nj^*}}{1 - P_{nj^*}} + 1 \right) \right]. \quad (6)$$

На основании вышеизложенного получаем вероятность P_{down} , подставив которую в (3) для пропускной способности, получим искомые интенсивности нисходящего и восходящего трафика.

Если базовая станция работает в режиме насыщения, то для соответствующих вероятностей получим: вероятность начала передачи базовой станцией

$$\tau_{down} = \frac{2(1 - 2P_{down})}{(1 - 2P_{down})(W + 1) + P_{down}W(1 - 2P_{down})^r}, \quad (7)$$

где

$$P_{down} = 1 - \prod_j (1 - P_{nj})$$

– вероятность того, что передача базовой станцией оказалась неудачна.

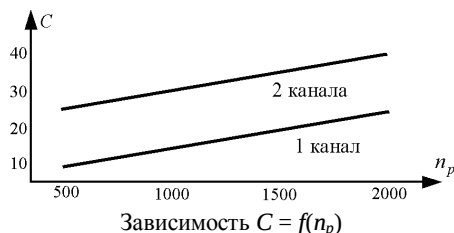
Вероятности начала передачи терминалами определяются, $C_{down}/N_i = kC_j/m_j$, следующим выражением:

$$P_{nj} = \frac{1}{1 + \frac{kN}{m_j} \frac{1 - P_{down}}{P_{down}}},$$

то есть (15) преобразуется к виду

$$P_{j*} = 1 - 1 / \prod_j \left(\frac{m_j}{kN} \frac{P_{down}}{1 - P_{down}} + 1 \right). \quad (8)$$

Найдя T_{down} и P_{down} из системы уравнений (6) и (8), с помощью формул (3) получим искомые интенсивности трафика.



Результаты расчета пропускной способности сети с одним и двумя частотными каналами в зависимости от длины передаваемого пакета представлены на рисунке.

Представленные расчеты показали увеличение пропускной способности сети более чем вдвое.

Выводы. Таким образом, приведена классификация возможных методов повышения пропускной способности СРД и проведено исследование пропускной способности многоканальной СРД.

Список литературы. 1. Романов А.И. Телекоммуникационные сети и управление / Романов А.И. – К.: Изд. пол. центр «Киевский университет», 2003. – 247 с. 2. Григорьев В.А. Сети и системы радиодоступа / Григорьев В.А., Лагутенко О.И., Распаев Ю.А. – М.: Эко-Трендз, 2005. – 384 с. 3. Шахнович И. В. Современные технологии беспроводной связи. Издание второе, исправленное и дополнено / Шахнович И. В. – М.: Техносфера, 2006. – 288 с. 4. Столлингс В. Беспроводные линии связи и сети / Столлингс В. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 640 с.

Поступила в редколлегию 20.10.09

УДК 629.735.05

И.И.ОБОД, докт.техн.наук, профессор, НТУ «ХПИ»;
Ю.САЛАХ АЛЬДИН, студент, НТУ «ХПИ»

АДАПТИВНЫЙ МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ СКОРОСТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ СИСТЕМ РАДИОДОСТУПА ПРИ ДЕЙСТВИИ ПОМЕХ

Наведено класифікацію адаптивних методів підвищення пропускної спроможності систем радіо доступу при дії завад. Приведено розрахунки впливу завад у каналі передачі даних на швидкість передачі і оптимізацію довжини пакету даних. Показано, що для оптимізації швидкості передачі даних необхідно використовувати адаптивний підхід управління MAC рівня, що передбачує оцінку середі передачі та динамічну зміну параметрів MAC рівня.

Adaptive methods classification of increase capacity of radio access systems is resulted at the noise action. The calculations of noise influencing are resulted in a data channel on speed of transmission and optimization of information package length. It is shown that for optimization of data rate it is necessary to take adaptive approach of the MAC level management which foresees the estimation of transmission environment and MAC level parameters dynamic change.

Постановка проблемы и анализ литературы. Создание информационной сети обслуживания пользователей невозможно без реализации надежной сети обмена данными [1]. В настоящее время беспроводные сети [2] передачи данных приобретают все большую популярность. Значительная часть исследований по улучшению работы беспроводных локальных сетей посвящена адаптивной настройке [3,4]. Адаптивная настройка позволяет устройству оптимизировать свои параметры в зависимости от характеристик среды. Это означает, что устройство само изменяет свои параметры, выбирая наиболее подходящий узел доступа, минимизирует влияние помех, оптимизирует работу беспроводной локальной сети и улучшает условия работы пользователей.

Цель работы. Исследование адаптивных методов повышения скорости передачи данных в системах радиодоступа (СРД) при действии помех.

Основной раздел. Известно [2], что пропускная способность канала связи C_k зависит от вида и параметров модуляции сигнала, вероятностей ошибок в радиоканале, способа кодирования, характеристик радиоканала, то есть является функцией от перечисленных параметров и характеристик:

$$C_k = f(\vec{V}_m, \vec{V}_{kod}, \vec{V}_{kan}, P_e), \quad (1)$$

$\vec{V}_m$ – вектор параметров модуляции, включающий описание вида модуляции, значение скорости модуляции V_m и др.; $\vec{V}_{kod}$ – вектор параметров способов кодирования; $\vec{V}_{kan}$ – вектор параметров радиоканала, P_e – вероятность ошибки на бит информации.

Изменение одного отдельно взятого параметра – обычно не лучший способ адаптации беспроводного устройства к постоянным изменениям сложной окружающей среды. По сути, адаптивный алгоритм управления MAC-уровнем пытается найти набор параметров, который обеспечил бы оптимальную общую пропускную способность беспроводного устройства.

Исходя из вышеизложенного, можно предложить следующую классифи-

кацию возможных методов повышения пропускной способности СРД, изложенной на рис.1. Все эти методы основаны на оптимизации (то есть адаптивном управлении) составляющих пропускной способности СРД, входящих в (1).



Рисунок1 – Классификация методов повышения пропускной способности СРД

Для пакетной сети [5], что есть характерным в настоящее время при передаче данных, параметр нагрузки связывают с такими показателями качества обслуживания, как время задержки доставки и вероятность потери пакета данных. Однако можно утверждать, что названные показатели качества обслуживания определяются пропускной способностью или скоростью передачи информации. Будем учитывать такие реально существующие факторы, как помехи, которые приводят к снижению вероятности ошибок (одиноких та групповых) и, как наследие, к уменьшению реальной скорости передачи информации. Для вышеопределенного эффективна скорость передачи данных при условии отсутствия переполнения буфера памяти можно определить как:

$$R_e = f(R_0, V_k, n_p, t_r, \varepsilon, P_e, z), \quad (2)$$

где R_0 – потенциальная скорость передачи информационных данных; V_k – скорость кодирования; n_p – длина пакету данных; t_r – время распространения сигналов через канал связи, а также анализа и подтверждения (или перезапроса) приема пакету; ε – показатель группирования ошибок в результате помех; z – количество перезапросов.

Пусть пакет длиной n_p имеет k информационных элементов, а вероятность появления ошибки в пакете составляет P . Тогда время, что затрачивается на одноразовую передачу пакета данных, можно определить как:

$$T_p = t_r + \frac{n_p}{R_0},$$

а среднее время на передачу пакета с учетом z возможных повторений отображается в таком виде:

$$t_1 = T_p \sum_{i=0}^z P^i.$$

Вероятность отказа канала и окончание времени на возобновление T_v при действии помех буде составлять P^z . С учетом вышеизложенного выражение относительно эффективной скорости передачи информации будет иметь такой вид:

$$R_e = V_k n_p \left[T_p \sum_{i=0}^{z-1} P^i + P^z (T_p + T_v) \right]^{-1}. \quad (3)$$

Если в системе передачи данных используются эффективные коды, которые могут обнаруживать ошибки, то можно утверждать что;

$$P \approx P(\geq 1, n_p) = P_e n_p^\varepsilon, \quad (4)$$

где $P(\geq 1, n_p)$ – вероятность сбоя в пакете длиной n_p одного и больше элементов.

После подстановки (4) в (3) получаем:

$$R_e = V_k R_0 \frac{n_p (1 - P_e n_p^\varepsilon)}{(R_0 t_r + n_p) + R_0 T_v (P_e n_p^\varepsilon)^z}. \quad (5)$$

Выражение (5) очевидно демонстрирует влияние основных четырех факторов, что влияют на снижение R_e . Сомножитель в числителе (что в дужках) означает степень снижения R_e в результате влияния помех. Первая сумма в знаменателе определяет величину потерь R_e , которые обусловленные временем анализа ожидания на приемном пункте и ожиданием подтверждения на передающем пункте t_r . Вторая сумма обуславливает потери R_e , что вызваны возможным действием помех и превышением допустимого значения количества перезапросов z .

Анализ выражения (5) показывает, что величина R_e в зависимости от n_p имеет максимум, значения которого зависит от R_0 , V_k , t_r , z , P_e , ε та T_v . Величина R_e определяет реальную пропускную способность сетевого оборудования и, таким образом, с одной стороны, определяет время передачи пакета, а с другой стороны, влияние помех на системные характеристики системы обслуживания. Этим самым, параметр R_e можно считать одним с основных факторов, что непосредственно связывает параметр загрузки с показателями качества обслуживания. Оптимальное значения длины пакета $n_{порт}$, которое обеспечивает возможность достижения $R_{еmax}$, определяется с уравнения $dR_e/dn_p = 0$, которое даже при условиях абсолютной аппаратной надежности имеет трансцендентный вид и в общем виде не имеет аналитического решения относительно n_p . На рис. 2 наведена зависимость скорости передачи информации от длины пакета при разных вероятностях появления групповых ошибок. Как следует с рис. 2 имеется оптимальное значения длины пакета, которое зависит от вероятности появления групповых ошибок.

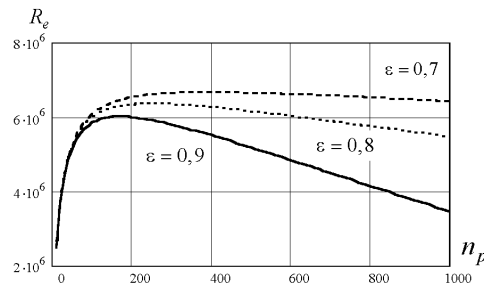


Рисунок 2

На рис. 3 показано влияние вероятности ошибки на бит информации на оптимальную длину пакета передаваемой информации.

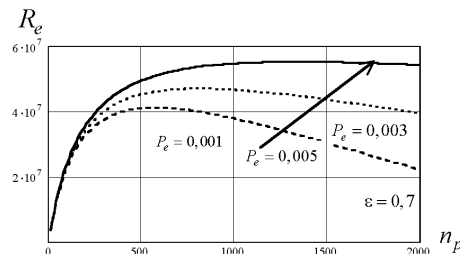


Рисунок 3

Приведенные на рис. 2 и 3 расчеты получены при скорости кодирования $\frac{3}{4}$.

Таким образом, приведенные выше расчеты позволяют предложить алгоритм адаптивного управления MAC-уровнем. Этот алгоритм должен предусматривать анализ характеристик беспроводной среды передачи данных, должен дать беспроводному устройству возможность динамически менять различные параметры MAC-уровня в зависимости от изменений среды. Как и алгоритм выбора наилучшего узла доступа, адаптивный алгоритм управления MAC-уровнем пытается найти оптимальные настройки для конкретной среды. Алгоритм должен учитывать:

- Скорость передачи, которая определяется целевым значением частоты ошибочных битов при заданном отношении сигнал-шум. При разных скоростях передачи используются разные методы модуляции, поэтому для поддержания требуемого значения P_e очень важно правильно выбрать скорость передачи.
- Порог фрагментации, который определяет размер MAC-кадров (из которых состоят пакеты), передаваемых по радиоканалу. Если порог слишком мал, накладные расходы, связанные с заголовками MAC- и физического уровней, снижают общую пропускную способность, доступную клиентскому устройству. Если порог слишком велик, MAC-

кадры становятся уязвимыми для помех.

- Порог RTS (готовность к передаче), который определяет, требуется ли обмен сигналами RTS-CTS перед передачей MAC-кадра. Обмен кадрами RTS-CTS служит для «резервирования» среды передачи перед передачей кадров данных, чтобы исключить коллизии в среде передачи.

При использовании адаптивного алгоритма одновременно со снижением скорости передачи данных снижается и порог RTS. Это уменьшает вероятность коллизий при одновременной отправке нескольких пакетов. Меняется и порог фрагментации, чтобы установить наилучший размер для новых пакетов. Задача состоит в том, чтобы определить оптимальную конфигурацию для множества взаимосвязанных параметров. Изменение одного параметра (например, скорости передачи) влияет на оптимальные значения других параметров, например порога RTS.

Выводы. Получены аналитические зависимости и проведенные по ним расчеты позволяют оптимизировать скорость передачи информации в СРД при наличии помех на основе адаптации.

Список литературы. 1. Романов А.И. Телекоммуникационные сети и управление / Романов А.И. – К.: Изд. пол. центр «Киевский университет», 2003. – 247 с. 2. Григорьев В.А. Сети и системы радиодоступа / Григорьев В.А., Лагутенко О.И., Распаев Ю.А. – М.: Эко-Трендз, 2005. – 384 с. 3. Шахнович И. В. Современные технологии беспроводной связи. Издание второе, исправленное и дополнено / Шахнович И. В. – М.: Техносфера, 2006. – 288 с. 4. Столлингс В. Беспроводные линии связи и сети / Столлингс В. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 640 с.

Поступила в редакцию 11.08.2009

УДК 621.396.96

М.Ю.ОХРИМЕНКО, ассистент, НТУ «ХПИ»

РОЗПОДІЛЕНА ОБРОБКА ІНФОРМАЦІЇ В ЄДИНІЙ ІНФОРМАЦІЙНІЙ МЕРЕЖІ СИСТЕМ СПОСТЕРЕЖЕННЯ

Приводиться порівняльний аналіз трьох способів розподіленої обробки інформації на рівні виявлення сигналу, виявлення об'єкта, супроводу об'єкта в єдиній інформаційній мережі систем спостереження. Виявлено переваги та недоліки приведених способів при ідентифікації об'єктів в інформаційній мережі. Показано межі застосування кожного зі способів розподіленої обробки інформації.

The article contains a comparative analysis of three data distributed processing methods i.e. signal location level, object location level and object tracking level in the unified information network of the supervision systems. Advantages and disadvantages of these methods in object identification in information network are revealed. Application ranges each of data distributed processing methods are shown.

Постановка завдання та аналіз літератури. У відповідності до державної цільової науково-технічної програми створення державної інтегрованої інформаційної системи забезпечення управління рухомими об'єктами (зв'язок, навігація, спостереження) затвердженою постановою Кабінету Міністрів Укра-

їни від 17 вересня 2008 р. № 834 в Україні планується проведення ряду заходів щодо створення інтегрованої інформаційної системи з метою наближення розвитку транспортної галузі України до світового рівня на основі використання сучасних інформаційних технологій.

У роботі [1] обговорюється можливість реалізації подібної системи у вигляді єдиної інформаційної мережі систем спостереження. Створення такої мережі дозволяє отримати ряд переваг у інформаційному забезпеченні споживачів [1,2,3]. Перехід до синхронної мережі систем спостереження, як показано у зазначених роботах, дозволяє здійснити кооперативний прийом сигналів та розподілену обробку інформації.

Мета роботи – порівняльний аналіз трьох способів розподіленої обробки інформації на рівні виявлення сигналу, виявлення об'єкту, супроводу об'єкту в єдиній інформаційній мережі систем спостереження.

Основна частина. При об'єднанні радіосигналів на спільну обробку передається вся сукупність сигналів, зовнішніх завад і власних шумів, що надходять на входи приймальних позицій або безпосередньо, або після попередньої лінійної фільтрації в кожній позиції. Таким чином подібні інформаційні мережі вимагають використання ліній передачі даних (ЛПД) із великою пропускною спроможністю.

Задача виявлення сигналу може бути вирішена за допомогою наступної моделі [4]. Гіпотези $H_{i,j} = 0, 1$ (відсутність або наявність сигналу) формують випадкові вектори r_n незалежно один від одного. Ці вектори поступають на входи детекторів, що являють собою порогові пристрої. Детектори формують попередні рішення $A = \{\alpha_k\}$ за алгоритмом (1), де ρ_0 та v_j відповідно порогові значення та вага, що залежать від вірогідності пропуску сигналу p_{mj} та вірогідності ложної тривоги p_{fj} у кожному з детекторів. Після цього попередні рішення передаються в центральний процесор, де приймається остаточне рішення α_0 про наявність сигналу. Остаточне рішення приймається, базуючись на Булевих комбінаціях попередніх рішень $A = \{\alpha_k\}$

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n v_j \alpha_j > \rho_0, & \quad \alpha_0 = 1; \\ \sum_{j=1}^n v_j \alpha_j < \rho_0, & \quad \alpha_0 = 0, \end{aligned} \quad (1)$$

де

$$v_j = \omega_j / \sum_{j=1}^n \omega_j ;$$

$$\rho_0 = \eta_0 / \sum_{j=1}^n \omega_j ;$$

$$\omega_j = \ln \left\{ \frac{(1-p_{mj})(1-p_{fj})}{p_{mj}p_{fj}} \right\};$$

$$\eta_0 = \ln \left\{ \lambda \prod_{j=1}^n \frac{(1-p_{fj})}{p_{mj}} \right\}.$$

Схематично процес виявлення сигналу має наступний вигляд (рис. 1).

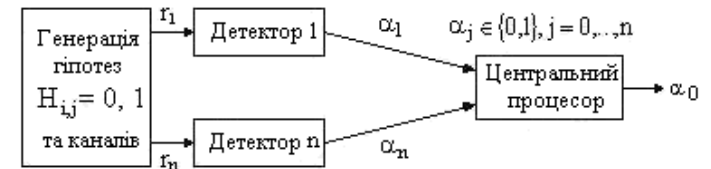


Рисунок 1

При об'єднанні координат виявлених об'єктів знижуються вимоги до пропускної спроможності ЛПД. Уся первинна обробка інформації, включаючи виявлення об'єктів і обчислення їхніх координат проводиться в кожній позиції окремо, а на спільну обробку надходить тільки інформація, що визнана «корисною» у результаті первинної обробки. Одночасно з координатною інформацією з приймальних пунктів передається й оціночна матриця точності виміру координат та час її одержання.

При вирішенні задачі виявлення об'єкту [5] корисну інформацію $\alpha(t)$ отримують із хвильового поля $y(t, \rho)$ у апертурі прийому на центральному пункті обробки. Поле $y(t, \rho)$ можна представити у вигляді сукупності поля радіосигналів $S(t, \rho)$, що переносять інформацію про параметри об'єкта (через параметри сигналу $\lambda(\alpha)$ та деякі незмінні параметри $\beta(t)$) та поля завад $N(t, \rho)$:

$$y(t, \rho) = S[t, \rho, \lambda(\alpha), \beta(t)] \cdot N(t, \rho).$$

Об'єкт задається моделлю, що описується диференціальним рівнянням

$$\frac{d}{dt} \alpha(t) = F(t, \alpha) + G(t, \alpha) N_\alpha(t), \quad \alpha(0), \quad (2)$$

де $F(t, \alpha)$ та $G(t, \alpha)$ – задані матричні функції відповідної розмірності, $N_\alpha(t)$ – центрований білий гаусовський шум, $\alpha(0)$ – випадкова початкова умова.

Об'єкт схематично має наступний вигляд (рис. 2).

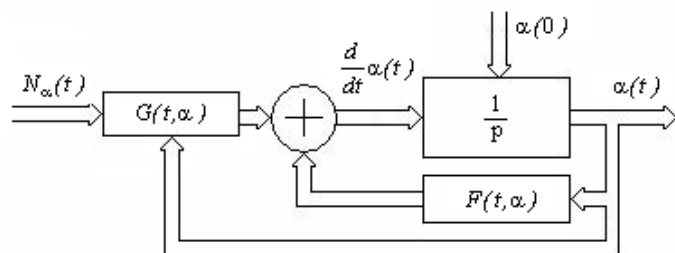


Рисунок 2

У [5] приводиться синтез пристрою оцінювання параметрів об'єкту, що складається з двох блоків. На входи обох блоків подаються вектор-функції сигналів $y(t, \rho)$. На виході блоку оцінювання формується поточна оцінка $\hat{\alpha}(t)$. Блок оцінювання включає оптимальний дискримінатор (ОД) та оптимальний фільтр (ОФ), структура якого визначається рівнянням (2). Оцінка $\hat{\alpha}(t)$ перебуває в дискримінаторі. Коефіцієнт перетворення блока оцінювання реалізується блоком точності, який формує апостеріорну кореляційну матрицю помилки $\hat{E}(t)$, що характеризує точність оцінювання. Пристрій оцінювання параметрів об'єкта [5] має наступний вигляд (рис. 3).

При супроводі об'єктів у кожній позиції проводиться не тільки первинна, але і вторинна обробка інформації, яка завершується побудовою траєкторій об'єктів. Параметри траєкторій об'єктів, що супроводжуються, з оціночною результуючою матрицею точності і часом її одержання передаються для спільної обробки. Спільна обробка надалі полягає у проведенні фільтрації траєкторій виявлених цілей, у результаті якої додатково відсіваються «помилкові» і уточнюються «вірні» траєкторії. Вимоги до пропускної спроможності ЛПД можуть бути істотно нижчі ніж у попередніх випадках. Саме цей спосіб найбільш зручний при побудові єдиної інформаційної мережі. Однак слід зазначити, що об'єднання на рівні координат дозволяє на пункті спільної обробки побудувати траєкторію цілі в тому випадку, коли на кожному із приймальних пунктів час спостереження цієї цілі недостатній для зав'язки траєкторії.

Робота системи супроводу складається з наступних етапів: зав'язка (виявлення) траєкторії, встановлення кореляційних зв'язків між відмітками та траєкторіями, екстраполяція траєкторії, фільтрація траєкторії, припинення супроводу. Схематично процес супроводу об'єкта [6] представлений на рис. 4.

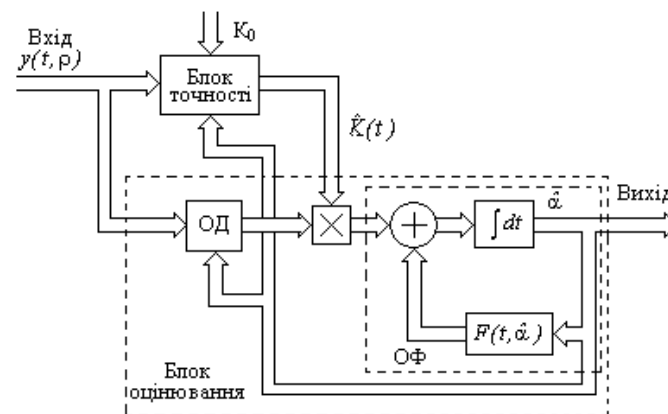


Рисунок 3

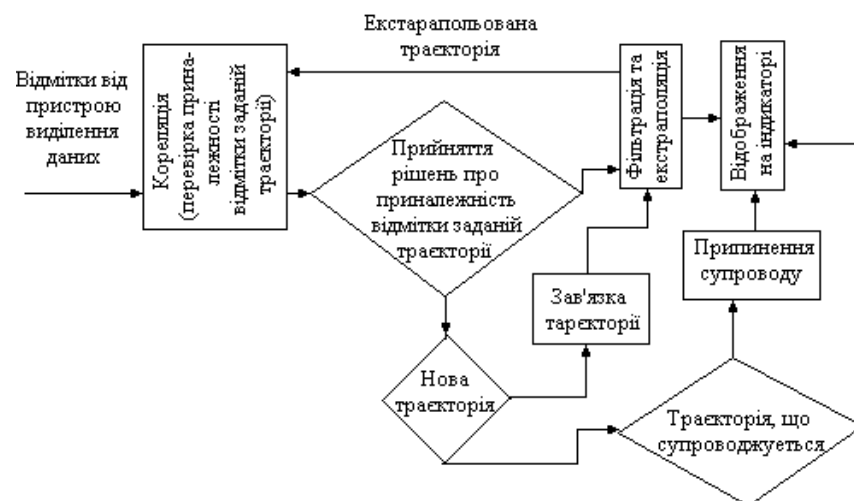


Рисунок 4

Система супроводу передає в процесор дані зміни місцезнаходження об'єкта. В процесорі із відміток формуються траєкторії об'єктів. Процесор повинен правильно виявити приналежність нових відміток к існуючим траєкторіям та зав'язати нові траєкторії по відміткам, що отримані від нових виявлених об'єктів. Визначення приналежності відміток виконується фільтром супроводу, який на основі аналізу вимірів, викривлених шумом, та екстрапольованих значень видає оновлені оцінки траєкторії. Екстрапольовані значення координат та середня квадратична оцінка їх точності використовуються для виявлення місцезна-

ходження та розмірів області, в якій з найбільшою вірогідністю можуть бути отримані відмітки від об'єкта в наступні моменти часу. Таким чином фільтр супроводу грає важливу роль не лише в формуванні точних оцінок координат, та характеру руху об'єкта, а й при виявленні приналежності відмітки до траєкторії.

Висновки. Таким чином проведено порівняльний аналіз способів розподіленої обробки інформації у єдиній інформаційній мережі систем спостереження. Виявлено, що чим менше інформація губиться в кожній позиції до спільної обробки, тобто чим вищий рівень об'єднання інформації, тим вище енергетичні й інформаційні можливості єдиної інформаційної мережі, але тим складніша система і вищі вимоги до пропускної спроможності лінії передачі даних.

Список літератури: 1. Комплексне інформаційне забезпечення систем управління польотами авіації та протиповітряної оборони // В.В.Ткачев, Ю.Г.Даник, С.А.Жуков, І.І.Обод, І.О.Романенко. – К.: МОУ, 2004. – 342 с. 2. Теоретичні основи побудови завадозахищених систем інформаційного моніторингу повітряного простору / В.В.Ткачев, Ю.Г.Даник, С.А.Жуков, І.І.Обод, І.О.Романенко. – К.: МОУ, 2004. – 271 с. 3. Обод І.І., Заволодько Г.Е., Охрименко М.Ю. Єдине координатно-часове забезпечення як основа розв'язування протиріч інформаційної мережі систем спостереження // Вестник НТУ «ХПИ». – Х.: НТУ «ХПИ». – 2008. – Вып. 24. – С. 113-119. 4. R.Srinivasan, P.Sharma and V.Malik Distributed detection of Swerling targets // IEE Proceedings. – Vol. 133, Pt. F, No. 7. – December 1986. 5. Многопозиционные радиотехнические системы / В.С.Кондратьев, А.Ф.Котов, Л.Н.Марков; Под ред. проф. В.В.Цветнова. – М.: Радио и связь, 1986. – 264 с. 6. Фарина А., Студер Ф. Цифровая обработка радиолокационной информации. Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1993. – 320 с.

Надійшла до редколегії 01.09.2009

УДК 681.3.07

В.М.ПОШТАРЕНКО, канд.техн.наук, доцент, НТУ «ХПІ»;
О.Ю.ВИНОГРАДОВА, студент, НТУ «ХПІ»;
Д.С.БОГОМАЗ, студент, НТУ «ХПІ»

ОПТИМІЗАЦІЯ МЕРЕЖ IP/MPLS ЗА ПРОДУКТИВНІСТЮ НА ОСНОВІ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Розроблено імітаційну модель магістральної мережі IP/MPLS телекомунікаційної компанії МТС із використанням оптимізації в середовищі Network Simulator та проведено порівняння характеристик продуктивності мережі з традиційним розподілом навантаження в IP/MPLS мережах.

Simulation model of IP/MPLS backbone networks for telecommunication company MTS using optimization in Network Simulator environment is developed and capability comparison of network with traditional traffic distribution in IP/MPLS is performed.

Постановка проблеми. Популярність технології IP/MPLS як однієї з основних технологій транспортного рівня NGN швидко зростає. Але IP/MPLS наслідуює проблеми пакетної мережі IP. По-перше, це забезпечення поліпшення

якості обслуговування переданого трафіку, тобто зниження затримок, зменшення втрат та збільшення інтенсивності потоків трафіку. По-друге, завантаження всіх ресурсів мережі повинно бути максимально можливим для підвищення обсягів переданого трафіку.

До недавнього часу задача оптимального використання ресурсів мережі вирішувалася найчастіше за допомогою перерозподілу ресурсів окремого маршрутизатора між різними потоками, що протікають через нього. У той же час такий потужний засіб, як вибір шляхів проходження трафіку через мережу, традиційно застосовувалося в IP-мережах в дуже обмежених масштабах. Від шляхів прямування трафіку (при його фіксованій інтенсивності) залежить завантаження маршрутизаторів і каналів, а значить, і ефективність використання мережі.

В сучасних протоколах задача маршрутизації розглядається як вибір найкоротшого шляху до адресата на підставі одного з простих параметрів, наприклад, часу доставки (затримка). Питання оптимізації продуктивності не є для них основним, у результаті маршрутизація найкоротшим шляхом часто створює незбалансований розподіл трафіку і, як наслідок, неефективне використання ресурсів мережі. Обраний шлях може бути більш раціональним, якщо в розрахунок приймається номінальна пропускна спроможність каналів зв'язку чи затримки, що вносяться ними, або менш раціональним, якщо враховується тільки кількість проміжних маршрутизаторів між вихідною та кінцевою мережами, але в будь-якому випадку вибирається єдиний маршрут навіть при наявності декількох альтернативних (рис. 1).

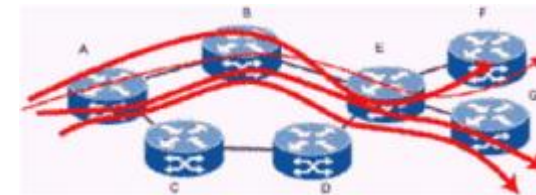


Рисунок 1 – Неефективність завантаження ресурсів мережі шляхами, що визначаються протоколами маршрутизації

Для вирішення завдань мінімізації перевантажень у процесі керування трафіком найбільш перспективними є методи Traffic Engineering (TE).

Під терміном Traffic Engineering розуміють методи і механізми досягнення збалансованості завантаження всіх ресурсів мережі за рахунок раціонального вибору шляху проходження трафіку через мережу. Механізм керування трафіком надає можливість встановлювати явний шлях, за яким будуть передаватися потоки даних.

Незважаючи на актуальність проблеми, до теперішнього часу немає чітко визначеного математичного апарату [7], який би здійснював оптимізацію мереж за допомогою TE. Тому для цього доцільне використання імітаційного мо-

делювання, адже воно має такі переваги як легкість та наочність, а також можливість налаштування необхідної швидкості перебігу процесів у мережі.

Аналіз літератури. У літературі, присвяченій IP/MPLS [1, 2, 5], дедалі більше уваги приділяється питанням керування трафіком. Але найбільш перспективні методи – методи Traffic Engineering розглянуті досить поверхово, а офіційні документи по цій темі поки мають рекомендаційний характер [6, 7]. У статті [3] розглянуто проблеми керування трафіком у IP мережах і засоби технології MPLS, які їх вирішують. Існуючі публікації, присвячені оптимізації мереж IP/MPLS [4, 8] мають складну практичну реалізацію і здебільшого призначені для мереж на етапі проектування. У роботах [9, 10] представлені варіанти оптимізації мережі із застосуванням імітаційного моделювання. Результати роботи [12] доводять, що використання імітаційної моделі існуючої мережі дозволяє ефективно керувати трафіком і підвищувати продуктивність мережі.

Метою статті є розробка імітаційної моделі мереж IP/MPLS, що виконує оптимізацію за критерієм максимальної продуктивності на основі методів Traffic Engineering.

Імітаційна модель розроблена у середовищі Network Simulator (NS) [11]. Топологія ядра мережі відповідає топології магістральної мережі IP/MPLS оператора МТС, яка складається з 7 вузлів - великих міст України (рис. 2).

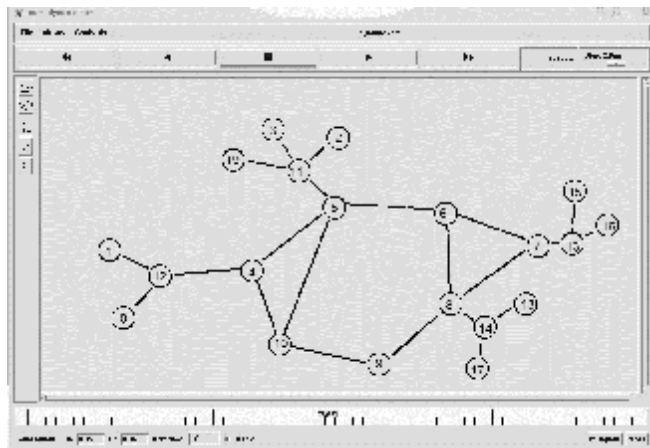


Рисунок 2 – Топологія мережі MPLS, що моделюється

Для передачі по мережі задано 5 потоків трафіку з постійною бітовою швидкістю і фіксованою довжиною пакетів з напрямками: 0→16, 1→15, 2→17, 3→18, 19→15. У процесі моделювання були задані пропускні спро-

жності каналів зв'язку 2-3 Мбіт/с.

Після того, як були задані вимоги для передачі трафіку, необхідно розподілити потоки трафіку. Трафік був заданий спеціально з урахуванням того, щоб мережа не змогла обслужити його повністю за найкоротшого шляху, що робить ефективність перенаправлення потоків наочною. Тобто такий варіант цілком може трапитися під час експлуатації реальної мережі.

Імітаційна модель відображає поведінку мережі у часі, тому для зняття часових характеристик продуктивності будемо у певний момент часу змінювати дизайн шляхів з комутацією по мітках (LSP) для можливості порівняння результатів роботи мережі у різних ситуаціях. Розглянемо ці ситуації.

1. Використання стандартної маршрутизації для знаходження LSP.

При моделюванні мережі MPLS система NS автоматично виконала знаходження маршрутів для передачі заданого трафіку між абонентами, виходячи зі стандартних протоколів маршрутизації, які взаємодіють з MPLS. Згідно з ним для трафіку між граничними маршрутизаторами по мітках (LSR):

- LSR12 і LSR13 був встановлений LSP, що проходить через LSR4, LSR5, LSR6, LSR7;
- LSR11 і LSR14 був встановлений LSP, що проходить через LSR5, LSR6, LSR8;
- LSR11 і LSR13 був встановлений LSP, що проходить через вузли LSR5, LSR6, LSR7 (рис. 3).

Як бачимо, LSR5 не справляється з навантаженням, є втрати пакетів і зниження швидкості передачі.

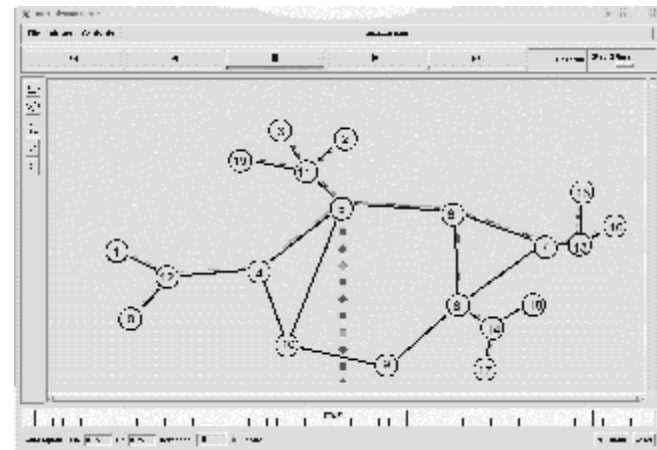


Рисунок 3 – Традиційна IP маршрутизація

2. Розподіл LSP з урахуванням оптимізації.

Для розвантаження мінімального розрізу необхідно перенаправляти весь потік або частину потоку на альтернативний маршрут, якщо такий існує. Таким чином замість використання тільки одного LSP з традиційним алгоритмом маршрутизації ми встановлюємо два LSP для кожного потоку і отримуємо наступний дизайн LSP (рис. 4).

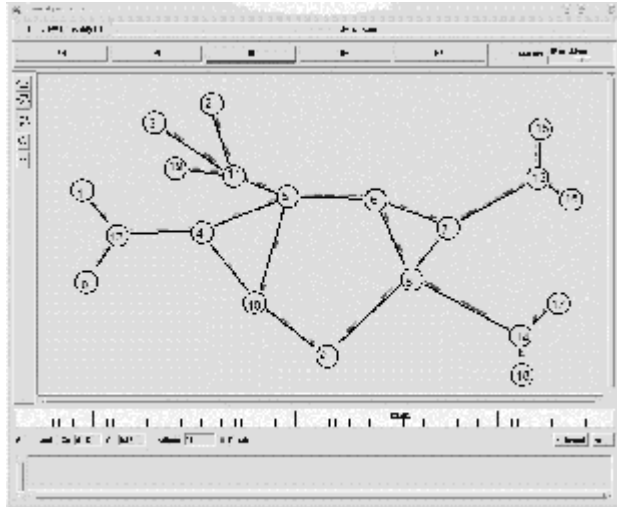


Рисунок 4 – Розподіл потоків з урахуванням оптимізації

Результатами моделювання є оцінка продуктивності MPLS в таких випадках:

- 1) при використанні тільки одного LSP для потоку між LSR12 і LSR13 і одного LSP між LSR11 і LSR14. Це відповідає часовому інтервалу 0 - 3,5 с (рис. 5), після чого дизайн LSP змінюється;
- 2) при передачі пакетів по двом LSP для потоку між LSR12 і LSR13 і по двом LSP між LSR11 і LSR14 (рис. 5).

Оцінювалася динаміка зміни продуктивності магістралі. Ця процедура описує створення графіку, який ілюструє поведінку мережі у часі, а саме – програмує зняття через проміжки часу миттєвих значень швидкості надходження даних у визначених вузлах, що визначається у Мбіт/с. Отриманий графік представлений на рис. 5.

Майже спочатку надходження трафіку у мережу спостерігається зниження продуктивності через втрату пакетів у чергах.

До 3,5 с, коли маршрути в мережі визначаються автоматично, спостерігається різке падіння обслуговування трафіка між вузлами 0 та 16, що добре видно на рис. 3. Тільки виконавши перерозподіл обох потоків, ми бачимо, що продуктивність мережі вцілому зросла і зникли перевантаження на усіх маршрутизаторах.

Оскільки інтенсивність отриманого трафіку коливається, сумарна продуктивність змінюється в границях від 2,5 до 2,9 Мбіт/с для першого сценарію і досягає 4 Мбіт/с для останнього сценарію. Тобто перерозподіл потоків істотно впливає на продуктивність мережі.

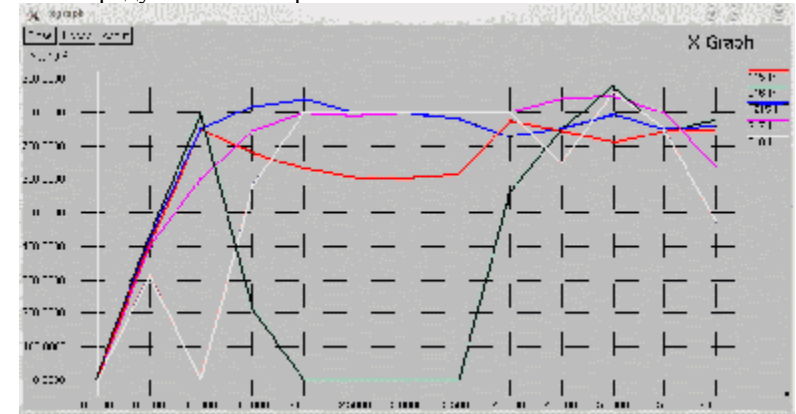


Рисунок 5 – Динаміка зміни продуктивності мережі від часу

Висновки. Результати імітаційного моделювання продемонстрували нерациональність традиційної IP маршрутизації і переваги використання оптимізації на основі методів Traffic Engineering. Дана модель використовує дані про топологію і поведінку трафіку, тому легко може застосовуватися при проектуванні та експлуатації магістральних мереж. Подальше вдосконалення розробки може поглибити подібність моделі до реальних характеристик мереж.

Список літератури: 1. Бакланов И.Г. NGN: Принципы построения и реализации. – М.: Эко-Трендз, 2008. 2. Семенов Ю.А. Телекоммуникационные технологии. Интернет-университет информационных технологий. Ресурс [http://book.itper.ru/]. 3. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Искусство оптимизации трафика // Журнал сетевых решений LAN. – № 12. – 2001. 4. Ю.П.Зайченко, Ахмед А.М. Шарадка Анализ и оптимизация характеристик сетей MPLS по заданным показателям качества. 5. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: Учебник для вузов. 3-е изд. – СПб.: Питер, 2006. 6. D.Awduche, J.Malcolm, J.Agogbua, M.O'Dell, J.McManus Requirements for traffic engineering over MPLS // RFC 2702, September 1999. 7. D.Awduche, A.Chui, A.Elwalid, I.Widjaja, X.Xiao Overview and Principles of Internet Traffic Engineering // Internet informational RFC 3272, May 2002. 8. Будылина Н.В., Коновалов П.А. Разработка программного обеспечения для оптимизации мультисервисных сетей // Открытое образование», июнь 2006. 9. Зайцев Д.А., Шинкарчук Т.Н. Моделирование телекоммуникационных сетей в системе NS // Наук.прац.ОНАЗ ім.О.С.Попова. – 2006. – № 2. 10. Т.З.Нижарадзе Разработка и исследование модели алгоритма динамической маршрутизации для сетей GMPLS. – диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Вологда, 2007. 11. Network Simulator // 2 Introduction Dept. Of Computer Science SUNY Binghamton Spring, 2006. 12. Виноградова О.Ю., Поштаренко В.М. Оптимізація транспортного рівня NGN на основі технології MPLS // XVII міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я». – Харків, 20-22 травня 2009 р.

Надійшла до редколегії 10.10.2009

О.Л.РЕЗИНКИН, канд.техн.наук, докторант НТУ «ХПИ»

ПОЛУЧЕНИЕ ТОЛСТЫХ СЛОЕВ СЕГНЕТОКЕРАМИКИ МЕТОДОМ ВАКУУМНОГО АЭРОЗОЛЬНОГО НАПЫЛЕНИЯ ПРИ КОМНАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

Наведені описи методу, експериментального стенду та технологічних режимів, які дозволяють проводити низькотемпературний синтез товстих шарів сегнетокерамік з загальною формулою $Ba_xSr_{1-x}Ti_3Zr_{1-y}O_3$ на поверхні металевих електродів. Обґрунтована перспективність одержаного нелінійного діелектричного матеріалу для застосування в галузі високовольтної імпульсної техніки.

The method, experimental rig and technological regimes for low temperature synthesis of bulk layers of $Ba_xSr_{1-x}Ti_3Zr_{1-y}O_3$ ceramic on metal electrodes surface are described. The availability of produced nonlinear dielectric material for application in the field of pulsed power technique is substantiated.

Диэлектрические материалы с высокой диэлектрической проницаемостью нашли широкое применение во всех областях науки и техники, так или иначе связанных с использованием электричества. В настоящее время открыты диэлектрики, величина относительной диэлектрической проницаемости которых достигает 10^6 на частотах до 10^9 Гц при комнатной температуре [1]. Среди диэлектриков, обладающих высокой диэлектрической проницаемостью наиболее широкое распространение получили материалы на основе сегнетоэлектриков – материалов обладающих спонтанной поляризацией в определенном диапазоне температур. Первым из открытых сегнетоэлектриков является сегнетова соль, относительная диэлектрическая проницаемость которой достигает 10^4 . В технике сегнетова соль практического применения не находит в основном из-за ее химической нестабильности. Наиболее широкое применение нашли сегнетоэлектрики в поликристаллическом состоянии, представляющие собой керамики на основе твердых растворов различных оксидов со структурой перовскита. Классической технологией получения сегнетокерамик считается высокотемпературный синтез, при котором измельченное сырье изготавливаемого керамического изделия подвергается прессованию или отливке из взвеси (так наз. шликера) и затем обжигу при температурах свыше 1000°C . Кроме высокого значения диэлектрической проницаемости большое практическое значение имеет нелинейный характер поляризации сегнетоэлектриков по отношению к напряженности внешнего электрического поля. Именно этим определяется ряд их интересных электрооптических, радиофизических, электромеханических, пьезо- и пьезоэлектрических свойств. В силу большой практической важности, технология производства сегнетокерамик находится на острие науки в течение десятилетий, прошедших с момента открытия в них явления спонтанной поляризации и возможности влиять на эту поляризацию при помощи воздействия сильных внешних электрических полей и других факторов [2-5].

На новый качественный уровень исследования в данной области вышли

вследствие современного развития нанотехнологий. Одним из важнейших параметров, определяющих применимость сегнетоэлектрика в современных быстродействующих приборах, является время его релаксационного перехода из одного поляризованного состояния в другое, отличающееся величиной и направлением вектора электрической индукции поля. Чем меньше размеры доменов, образованных зонами однородной спонтанной поляризации в сегнетоэлектрике, тем меньшей при прочих равных условиях оказывается длительность поляризационного перехода. Поэтому чрезвычайно важным является получение сегнетокерамик с предельно мелкокристаллической структурой. Довести размеры доменов до нанометровых возможно в том случае, если исходное сырье, из которого синтезируется керамика, является нанодисперсным. Однако простое измельчение сырья, являясь само по себе сложной научно-технической проблемой, еще не приводит к получению мелкозернистой поликристаллической структуры сегнетокерамики. При получении керамики традиционным методом высокотемпературного синтеза, включающего обжиг при температуре выше $1200\div 1400^\circ\text{C}$, происходит активный рост кристаллов и, как следствие, снижение высокочастотных свойств получаемых сегнетокерамических изделий.

Одним из наиболее перспективных современных методов синтеза сегнетоэлектриков является технология напыления аэрозолей нанодисперсных порошков в вакууме при комнатной температуре [6-8]. Данная технология, открывающая новое направление в области синтеза наноструктурных композитных материалов, в настоящее время только начинает завоевывать области своего применения и, судя по имеющимся публикациям [6-8], используется в настоящее время пока в областях микроэлектроники, MEMS и оптики. Представляется весьма многообещающим распространение достижений данной технологии на область электротехники и, в частности, высоковольтной импульсной техники.

Для проведения ряда экспериментальных исследований в области получения новых электротехнических материалов с нелинейными электрофизическими свойствами и последующего исследования самих этих свойств создан стенд, представленный на рис. 1. Вакуумный насос VP позволяет откачивать камеру DC до давления $P_{DC} = 0,5\div 1,5$ кПа. Ускоряющий газ из баллона GC заполняет эластичный ресивер при давлении, равном атмосферному. Из ресивера Re через ротаметр Ro ускоряющий газ поступает в генератор аэрозоля AC. Давление газа в генераторе аэрозоля при помощи вентиля ротаметра и жиклера-дозатора J поддерживается в пределах $P_{AC} = 50\div 70$ кПа. В генераторе аэрозоля имеется контейнер, заполненный порошкообразной измельченной сегнетокерамикой. Ускоряющий газ в генераторе аэрозоля смешивается с порошком и поступает на вход сопла N. Перепад давлений на входе и на выходе сопла приводит к ускорению аэрозоля в его полости.

Длина свободного пробега молекул ускоряющего газа соизмерима с размерами поперечного сечения сопла и на три порядка величины превосходит средний диаметр частиц керамики, поэтому процесс ускорения частиц в сопле

следует рассматривать с позиций молекулярно-кинетической теории газов. В результате ускорения на выходе сопла частицы керамики приобретают сверхзвуковую скорость. При столкновении частиц керамики с подложкой происходит их разрушение. При образовании новых химических связей, возникающих взамен оборванных при разрушении частиц, происходит соединение осколков с кристаллической структурой подложки и соседних осколков. Этим объясняется высокая адгезия синтезируемой керамики к подложке, а также ее высокие плотность и прочность. Не все частицы керамики разрушаются и реагируют с подложкой и с соседними частицами. При столкновении частиц керамики, движущихся под углом к поверхности подложки, их разрушение становится менее вероятным. В результате взаимодействия таких частиц с подложкой происходит очистка ее поверхности от механических и химических загрязнений, что способствует присоединению к подложке других частиц. Не прореагировавший порошок уносится потоком отработанного ускоряющего газа и задерживается электрофильтром ЕС. Механические удары, которые испытывают частицы не прореагировавшего порошка во время пролета по каналам стенда, приводят к накоплению в них внутренних механических напряжений, что положительно сказывается на их реакционной способности при вторичном использовании.

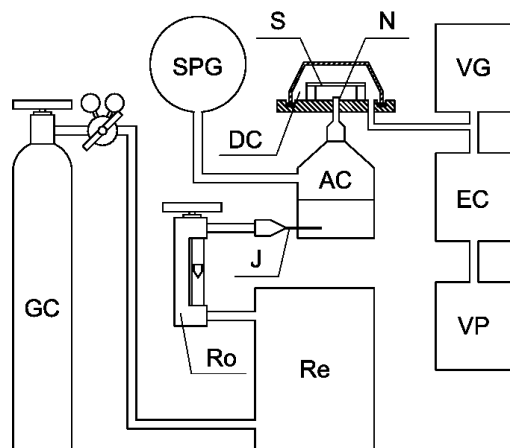


Рисунок 1 – Стенд для синтеза нелинейных диэлектриков

AC – генератор аэрозоля, DC – вакуумная камера, VP – вакуумный насос, N – сопло, S – подложка, VG – вакуумметр 13BT3-003, SPG – образцовый манометр ВО, GC – баллон с ускоряющим газом, Re – ресивер, Ro – ротаметр РС-3А, J – жиклер-дозатор, ЕС – электрофильтр.

В результате работы стенда на поверхности подложки нарастает плотный слой сегнетокерамики. В отличие от термического, ионного, магнетронного, вакуумно-дугового и других методов напыления данная технология позволяет быстро получить весьма толстые слои покрытия. Так например, скорость на-

пыления керамики, представляющей собой твердый раствор титанатов бария и стронция, допированный цирконием, на медную подложку составляла 5–35 мкм/мин. На рис. 2 представлен образец данной сегнетокерамики с толщиной напыленного слоя 250 мкм.



Рисунок 2 – Образец сегнетокерамического покрытия, нанесенного на медную подложку методом вакуумного аэрозольного напыления при комнатной температуре

Длительность синтеза образца составила 10 мин. при расходе ускоряющего газа 0,6 л/мин. В качестве ускоряющего газа применен азот с содержанием воды не выше 0,25 %. Для напыления использовано сопло круглого поперечного сечения с диаметром на выходе 0,5 мм. Расстояние от среза сопла до подложки составляло 6 мм. Средний диаметр частиц порошка, использованного для синтеза данного образца, составлял 50 нм. Для эффективного синтеза керамики на поверхности подложки существенное значение имеет технология помола, использованная при приготовлении порошка. Процесс напыления происходит интенсивно в том случае, если в частицах порошка накоплено механическое напряжение, достаточное для их легкого разрушения от удара. В данном случае был применен криогенный аэродинамический помол, позволивший получить порошок с необходимым уровнем механического напряжения в его частицах. В качестве материала подложки использована электротехническая медь без какой-либо предварительной подготовки поверхности. Исследование механической прочности данной синтезированной при комнатной температуре керамики показало, что она практически совпадает с прочностью образцов, полученных для идентичного состава методом традиционного горячего синтеза при температуре 1270 С с использованием изостатического прессования образцов при удельном давлении 900 кг/см². Возможность проводить синтез сегнетокерамики при комнатной температуре является значительным преимуществом метода вакуумного аэрозольного напыления. Температуры, необходимые для проведения горячего синтеза, не только приводят к росту зерен в керамике

и соответствующему ухудшению ее высокочастотных электрофизических свойств. Применение традиционной технологии, предполагающей обжиг керамических изделий, делает практически невозможным создание сложных композитных структур, включающих в себя внутренние металлические электроды, сегнетоэлектрические и ферромагнитные элементы. К таким структурам относятся, в частности, многослойные композиции [9], изоимпедансные среды [10] и метаматериалы [11].

При синтезе керамики на поверхности медной фольги толщиной 50 мкм было обнаружено, что с обратной стороны образца напротив слоя керамики образуется впадина. Глубина этой впадины зависит не только от толщины керамики, но и от параметров процесса напыления (расход ускоряющего газа, концентрация порошка в аэрозоле, скорость частиц керамики и т.д.). Данное явление свидетельствует о значительности сил адгезии керамики к подложке и высокой прочности самой керамики, а также о наличии механического напряжения в синтезированном сегнетокерамическом слое. Наличие механических напряжений в сегнетокерамике может влиять на ход процесса ее поляризации. Снизить или устранить механическое напряжение напыленного слоя керамики можно путем его отжига при температурах намного более низких, чем температура обычного синтеза. По данным J.Akedo [8], для снятия внутренних механических напряжений и доведения диэлектрической проницаемости и пьезомодуля в сегнетокерамике $Pb[Zr_xTi_{1-x}]O_3$ до значений, характерных для образцов, полученных по классической технологии, достаточно кратковременно нагреть нанесенное покрытие до температуры 600 °С.

Еще одной электрофизической характеристикой, особенно важной при практическом использовании сегнетокерамических материалов в высоковольтной импульсной технике, является их электрическая прочность. При использовании нелинейности сегнетокерамики для решения задач обострения электромагнитных импульсов путем формирования ударных электромагнитных волн [12, 13], при генерировании мощных высокочастотных колебаний за счет распада импульса поля на цуг солитонов [14] и при решении ряда других актуальных проблем техники сильных электромагнитных полей используется нисходящая ветвь зависимости диэлектрической проницаемости рабочего тела высоковольтной формирующей линии от напряженности электрического поля. Наиболее полное насыщение поляризации и, соответственно, наибольшее снижение диэлектрической проницаемости, необходимые для эффективной работы мощных обострителей и генераторов электромагнитных импульсов, наблюдаются в электрических полях, уровень напряженности которых приближается к электрической прочности рабочего тела. Экспериментальное определение электрической прочности керамики образцов аналогичных представленным на рис. 2, при толщине напыленного слоя 50 мкм показало, что данная характеристика для них значительно превосходит значения, для образцов керамики, полученной методом горячего синтеза. При проведении измерения электрической

прочности напыленной керамики в среде конденсаторного масла были получены значения $E_{пр} = 17 \div 25$ кВ/мм в зависимости от режима напыления. Эти значения в 1,4÷2,5 раза выше, чем электрическая прочность образцов сегнетокерамики того же состава, полученной по классической технологии.

Выводы: метод вакуумного аэрозольного напыления при комнатной температуре позволяет получить плотные слои сегнетокерамики $Ba_xSr_{1-x}Ti_yZr_{1-y}O_3$ толщиной в несколько сотен микрон на медной не подготовленной поверхности. Плотность и механическая прочность синтезированной этим методом керамики совпадает с соответствующими характеристиками измеренными на образцах, полученных традиционным методом горячего синтеза и близка к максимально теоретически возможной. Слои керамики, нанесенной методом аэрозольного напыления, находятся в механически напряженном состоянии. Электрическая прочность нанесенных слоев в 1.4÷2.5 раза выше, чем образцов того же состава, полученных по технологии горячего синтеза. Достигнутая скорость напыления сегнетокерамического порошка позволяет применять синтезируемые покрытия не только в областях техники, предполагающих их микроскопические размеры (микроэлектроника, микроэлектромеханические системы, фотоника), но и в электро- и радиотехнике, высоковольтной импульсной технике и т.д.

Список литературы: 1. S.Krohns, P.Lunkenheimer, Ch.Kant, V.Pronin, H.B.Brom, A.A.Nugroho, M.Diantoro, A.Loidl Colossal dielectric constant up to gigahertz at room temperature // Appl. Phys. Lett. 94, 122903. – 2009. 2. Б.М.Вул, Электричество. – 1946. – № 3. – С. 12. 3. Сегнетоэлектрики в технике СВЧ / Под ред. О.Г.Вендика. – М., Сов. радио, 1979. – 272 с. 4. Иванов И.В., Калягин В.М. Нелинейные свойства сегнетокерамики типа ВК при температурах выше точки Кюри // Электронная техника, радиодетали. – 1966. – Вып. 1. – С. 20-29. 5. Ротенберг Б., Листошнина М., Светлова Л., Тесленко С. Управляемый сегнетокерамический высоковольтный конденсатор. Малые диэлектрические потери на радиочастотах // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2001. – № 6. – С. 30-32. 6. J.Akedo, M.Lebedev Microstructure and Electrical Properties of Lead Zirconate Titanate ($Pb(Zr_{52}Ti_{48})O_3$) // Thick Film Deposited with Aerosol Deposition Method, Jpn. J. Appl. Phys. – 1999. – 38(9B). – p 5397-5401. 7. J.Akedo, M.Lebedev Ceramics Coating Technology based on Impact Adhesion Phenomenon with Ultrafine Particles – Aerosol Deposition Method for High Speed Coating at Low Temperature, Materia. – 2002. – 41(7). – P. 459-466. 8. J.Akedo, Room Temperature Impact Consolidation (RTIC) of Fine Ceramic Powder by Aerosol Deposition Method and Applications to Microdevices // J.Thermal Spray Technology. – V. 17(2). – 2008. – P. 181-198. 9. Y.K.Fetisov, A.A.Bush, K.E.Kamentsev, A.Y.Ostashchenko, G.Srinivasan Ferrite-Piezoelectric Multilayers for Magnetic Field Sensors // IEEE Sensors J. – V. 6 (4). – 2006. – P. 935-938. 10. <http://www.aiknyaz.org/pdf/media.zip>. 11. J.B.Pendry A Chiral Route to Negative Refraction // Science. – 306. – 2004. – P. 1353-1355. 12. О.Л.Резинкин, Г.В.Лисачук, В.В.Вытришко Использование нелинейности электрофизических свойств сегнетокерамики для генерирования мощных ударных электромагнитных волн // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. Силова електроніка та енергоефективність. – 2005. – Ч. 4. – С. 100-103. 13. И.Г.Камаев Ударные электромагнитные волны. – М.: Советское радио, 1963. – 148 с.

Поступила в редколлегию 09.11.2009

В.В.РУДАКОВ, докт.техн.наук, проф., НТУ «ХП»

СТАН ТА ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ІМПУЛЬСНИХ КОНДЕНСАТОРІВ

Наведені стан та тенденції розвитку мало втратних високовольтних імпульсних конденсаторів

The condition and tendencies of development of small losses power of high voltage pulse capacitors are given

Силові електричні конденсатори грають важливу роль при вирішенні проблем ресурсо- та енергозбереження. Відомо, наприклад, використання конденсаторів змінного струму для компенсації реактивної потужності електричних мереж та споживачів електричного навантаження [1]. Прогрес в розвитку силових конденсаторів змінної високої напруги перш за все пов'язано з використанням в якості твердого діелектрику двохвісіорієнтованої поліпропіленової плівки та синтетичної просочувальної рідини-фенілксилілетану [2]. Перспективними є розробки з використанням екологічно безпечних просочувальних рідин, які замінюють трихлордифеніл (токсично небезпечний та вилучений з виробництва у 80-х роках 20-го сторіччя): жарилек С101 та ДОН-3 (монодибензилтолуол), міксофлекс 1000 (диоктилфталат) [3]. Основною характеристикою конденсаторів, яка впливає на питомі показники, є робоча напруженість електричного поля. Для конденсаторів змінної напруги залежність робочої напруженості E (кВ/мм) від товщини діелектрику d , мм, має вигляд

$$E = Ad^{-0,5}, \quad (1)$$

де коефіцієнт A для плівкової ізоляції дорівнює: при просоченні конденсаторним маслом – 6,1, міксофлексом 1000 – 7,4, фенілксилілетаном – 8,9; для паперово-плівкової ізоляції (67 % плівки) при просоченні міксофлексом 1000 – 5,1, фенілксилілетаном – 7,2, жарилек С101 та ДОН-3 – 7,7. Використання паперово-плівкової ізоляції спричинено можливістю підвищити питому енергію за рахунок збільшення еквівалентної діелектричної проникності (відносна діелектрична проникність просоченого паперу у 1,5-2 рази вища за плівкову). В результаті вдалося підвищити робочу напруженість електричного поля з 14-16 кВ/мм, що притаманно для паперово масляних конденсаторів, до 40-45 кВ/мм для паперово-плівкових та до 49-51кВ/мм для плівкових конденсаторів [3]. Плівкові конденсатори до того ж мають суттєво менший тангенс кута діелектричних втрат, а значить і менші теплові втрати.

Починаючи з середини минулого сторіччя інтенсивно розвиваються ефективні імпульсні технології обробки матеріалів, які побудовані на ефекті накопичування енергії за тривалий час з подальшим її виділенням на навантаженні за короткий час, що на кілька порядків менший за час накопичування енергії [4]. До цих технологій відносяться магніто-імпульсна обробка металів [5],

отримання озону [6], технології з використанням електрогідралічного ефекту [7,8], на основі електроерозійної дії [9], КВІВ – технології [10], дослідження і створення потужних емнісних накопичувачів енергії [11]. Впровадження та удосконалення цих технологій дозволило суттєво покращити питомі характеристики обладнання в порівнянні з технологіями повільно-статичного навантаження, зменшити енергетичні витрати, покращити експлуатаційні показники технологічного обладнання та екологію довкілля, та отримати нові якісні ефекти.

Основним енергетичним вузлом устаткування для цих технологій є емнісний накопичувач енергії, який утворений з послідовно-паралельно з'єднаних високовольтних імпульсних конденсаторів. Базові технічні рішення і вимоги зі створення високовольтних імпульсних конденсаторів були засновані в 60-70 роках минулого сторіччя [12]. Оскільки вони мали менший ресурс ніж у конденсаторів змінної напруги і специфічні режими роботи, то принципи їх конструювання суттєво відрізнялися від методів розрахунку і створення конденсаторів змінної напруги. До імпульсних конденсаторів надаються такі вимоги: максимальна питома накопичена енергія, необхідний ресурс (як звичай 10^4 - 10^6 циклів заряд-розряд), мала власна індуктивність (одиниці і десятки наногенрі), теплова стійкість при високій частоті слідування імпульсів, малі втрати енергії в розрядному режимі, висока динамічна стійкість з'єднань секцій всередині та виводів конденсатору, виконання конструкції корпусу та виводів в сприятному вигляді для розміщення і з'єднання з іншими елементами устаткування.

Вимоги високої питомої енергії відносяться практично до усіх типів імпульсних конденсаторів. Питома енергія активного об'єму

$$W_{num} = \varepsilon E^2/2 \quad (2)$$

визначається діелектричною проникністю ε діелектрику і пропорційна квадрату робочої напруженості електричного поля. Для виготовлення потужних силових імпульсних конденсаторів використовують діелектрик на основі конденсаторного паперу КОН-2, КОН-3М підвищеної густини відповідно 1,2 та 1,35 кг/м³, що забезпечує підвищену електричну міцність та відносну діелектричну проникність, але більший ніж у конденсаторів змінної напруги тангенс кута діелектричних втрат при просоченні касторовим маслом [13]. В останні роки більше уваги стали приділяти використанню синтетичних плівок та відповідних просочувальних рідин. Добрі питомі характеристики отримані при використанні конденсаторної електротехнічної поліетилентерефталатної плівки ПЭТ КЭ [14] та поліпропіленової плівки [15-17] в тому числі в комбінації з конденсаторним папером при різних видах просочення касторовим та трансформаторним маслами, фенілксилілетаном, поліметилсилоксановою рідиною. В результаті відносна діелектрична проникність становить $\varepsilon = 2,3 - 5,4$ і суттєво підвищити питомі характеристики за рахунок ε є проблематичним. Крім того, чим більше ε , тим менше значення робочої напруженості електричного поля. Тому основним шляхом підвищення питомої енергії у відповідності з фор-

мулою (2) є підвищення робочої напруженості електричного поля.

Робоча напруженість визначається: короткочасною електричною міцністю ізоляції і тривалою міцністю або процесами руйнування діелектрику при роботі в імпульсному режимі. Основне значення при цьому мають тип використаного діелектрику та режим роботи конденсатору. На значення робочої напруженості основний вплив мають ресурс, надійність при заданому розряді, форма імпульсу в розрядному режимі (аперіодичний чи коливальний розряд), частота повторення імпульсів. Значення робочою напруженості більше ніж у конденсаторів змінної напруги, але менше короткочасної електричної міцності ізоляції. Прагнення підвищення напруженості електричного поля пов'язано з необхідністю зменшення ресурсу.

Для зразків конструкції поліпропілен-поліетилентерефталат (однієї з кращих плівкових систем) в роботі [17] отримано наступну емпіричну формулу залежності середньо статичного ресурсу M від основних діючих чинників

$$M = 9,347 \cdot 10^{21} E^{-7,025} f^{0,082} F^{-0,299} \Delta^{0,037} 10^{3,897 \cdot 10^{-3} T}, \quad (3)$$

де E – напруженість електричного поля кВ/мм, f – частота слідування імпульсів Гц, F – частота розрядного струму Гц, Δ – декремент коливаль, T – температура в градусах Кельвіна.

Для зразків паперово-касторової ізоляції відомі дві аналогічні залежності для середньо статичного ресурсу [17]

$$M = 2,72 \cdot 10^{21} E^{-8} f^{0,21} F^{-0,237} \Delta^{1,165} 10^{2,73 \cdot 10^{-3} T}, \quad (4)$$

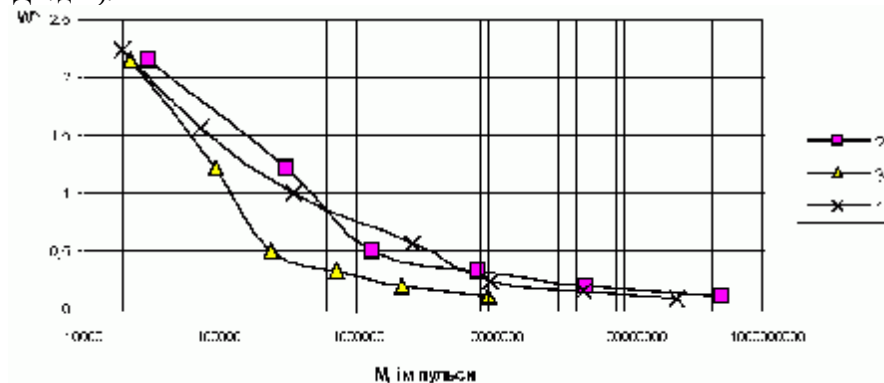
та [22]

$$M = 1,94 \cdot 10^{15} E^{-5} F^{-0,22} \Delta^{0,82} \quad (5)$$

де на відміну від (3) частота розрядного струму F в кГц, а інші чинники в тих же одиницях.

Тому для кожного типу діелектрику важливо встановити залежності напруженості електричного поля, а краще питомої енергії від ресурсу. Для більшості типів вітчизняних та закордонних конденсаторів 80-х років минулого сторіччя (паперові та паперо-лавсанові з просоченням касторовим маслом) питома енергія становила 50-100 Дж/дм³ при напруженості 70-100 кВ/мм [12]. Теоретичні граничні питомі характеристики для цієї ізоляції для близького до аперіодичного розряду (найбільш сприятливого) при ресурсі 10^4 імпульсів, що розрахований за формулами (4-5), становлять 9-10 кДж/дм³ без врахування об'єму фольги, закраїн, надійності. Це значення питомої енергії розраховано за формулою (2) для напруженості 200 кВ/мм та відносної діелектричної проникності 5,4. Однак при напруженості 150 кВ/мм і більше суттєво зростає відсоток конденсаторів, які не витримують приймальні випробування. Крім того реальна питома енергія в десятки разів менша для усіх типів конденсаторів внаслідок необхідності використання фольги, допоміжних ізоляційних і конструктивних елементів, а також врахування статистичних характеристик (значне збільшення площі обклади) та надійності. На рисунку приведені залежності відно-

сної питомої енергії W^* паперово-касторових (криві 2 і 3) та плівкових конденсаторів (крива 1) від ресурсу. Питома енергія W^* розрахована як відношення теоретичного значення енергії при різних значеннях напруженості до значення питомої енергії плівкового діелектрика (відносна діелектрична проникність 2,5) при напруженості 200 кВ/мм і значеннях чинників $f = 2$ Гц, $F = 20$ кГц, $\Delta = 11$, $T = 293$ К (теоретичне значення питомої енергії становить 4,4 кДж/дм³).



Залежність W^* від M для слабо затухаючого коливального розряду:
1 – за формулою (3), 2 – за формулою (4), 3 – за формулою (5)

Подальші дослідження паперово-касторових конденсаторів пов'язані з удосконаленням конструкцій, покращанням технології виготовлення. Ці заходи можуть незначно збільшити приведені на рис. граничні питомі характеристики. Однак, ці конденсатори залишаються конкурентноздатними та привабливими з точки зору ціни та якості для ресурсу $10^4 - 10^6$ імпульсів і більше. Тому дослідження в напрямку удосконалення високовольтних імпульсних конденсаторів з просоченням касторовим маслом є актуальними і в наш час і визначають тенденцію їх удосконалення. Так в роботах [19, 20] досліджено вплив товщини паперо-касторової ізоляції на ресурс та розроблено методику порівняльного аналізу, що дозволило удосконалити конструкції конденсаторів з послідовно з'єднаними секціями, збільшити ресурс, зменшити індуктивність і ціну. В роботі [21] представлено результати дослідження оригінального конденсатору з паперо-лавсановою ізоляцією, яка просочена касторовим маслом. Конденсатор імпульсно заряджається до 200 кВ. Ємність конденсатору становить 1,5 нФ, а індуктивність не більше 20 нГн при робочій напруженості 140 кВ/мм. Конструктивно введені допоміжні обкладки, які розташовані зі зміщенням та мають загнуті по периметру крайки, що послаблює крайовий ефект шляхом ділення ізоляції на тонкі шари. Досягнуто ресурс $2 \cdot 10^3$ імпульсів при питомої енергії 100 Дж/дм³. В роботі [16] проведено дослідження характеристик трьох типів ізоляції: паперо-лавсанової, паперо-поліпропіленової, паперо-фторопластової, які просочені касторовим маслом. На основі цих типів ізоляції

створені відповідно конденсатори з енергозапасом 112,8 Дж, 72,8 Дж та 72,8 Дж на напругу 50 кВ. При більших значеннях накопиченої енергії паперо-лавсановий конденсатор має більші втрати при розряді. Автори рекомендують конструкцію паперо-поліпропіленового конденсатора, який просочений касторовим маслом, з робочою напруженістю електричного поля 160 кВ/мм та ресурсом $4 \cdot 10^3$ імпульсів при реверсі напруги 10 %. Таким чином, бажання збільшити робочу напруженість електричного поля до 140-160 кВ/мм для паперової і комбінованої ізоляції, що просочена касторовим маслом [16, 21], на практиці звертається зменшенням ресурсу (менше чим 10^4 імпульсів). Перехід від коливального режиму розряду ($\Delta \rightarrow 1$) до аперіодичного ($\Delta \rightarrow \infty$) приводить до збільшення ресурсу, як показали ресурсні випробування, не більше, чим на 2 порядки. Дослідження з удосконалення високовольтних імпульсних конденсаторів з просоченням касторовим маслом є актуальними і в наш час. Так отримані позитивні результати використанню касторового масла при підвищених температурах та тиску, що важливо для створення конденсаторів, які працюють в заглублених пристроях (наприклад, з метою підвищення дебету нафтових свердловин) [23]. Показано, що електрична міцність підвищується в 1,85 рази при 100 °C та тиску $3 \cdot 10^5$ Па. Таким чином, досягнутий рівень питомої енергії високовольтних імпульсних конденсаторів з просоченням касторовим маслом при ресурсі $10^4 - 10^5$ імпульсів становить 100-160 Дж/дм³ [23].

Одночасно з тенденцією удосконалення конденсаторів, які просочені касторовим маслом, стає актуальною *тенденція* удосконалення високовольтних імпульсних конденсаторів шляхом переходу на чисто плівкові конденсатори з просоченням різними діелектричними рідинами. Ця тенденція явилася результатом прогресу, який досягнуто в виготовленні більш якісних плівкових матеріалів з шорсткою поверхнею. Це дозволило проводити якісне просочення без паперового діелектрику. Крім того, використано накопичений досвід створення плівкових конденсаторів змінної напруги. Основною перевагою використання плівкової ізоляції є можливість суттєвого зменшення товщини діелектрику між обкладками шляхом зменшення кількості шарів плівки до 2-3 в зрівнянні з паперовими, де оптимальна кількість шарів паперу становить 5-8. До цього ж тривала електрична міцність плівкового діелектрику в 1,5-2,5 рази вища [3]. Ця перевага забезпечена практично відсутністю струмопровідних включень на 1 м² плівкових діелектриків і високою короткочасною електричною міцністю плівки. Аналіз рис. показує, що питома енергія плівкових конденсаторів знаходиться на рівні кращих зразків паперово-касторових конденсаторів, а плівкові конденсатори поступово змінюють імпульсні паперові конденсатори.

Всеросійським електротехнічним інститутом сумісно з фірмою «Русская технологическая группа 2» проведені роботи зі створення високовольтних імпульсних конденсаторів на основі поліетилентерефталатної плівки, яка просочена фенілксилетаном [14]. Результати досліджень, що проведені автором [14], дозволили встановити ряд вимог до удосконалення технології виготов-

лення плівкових імпульсних конденсаторів: пресування в пакеті при оптимальних значеннях механічного тиску; намотування секцій в чистому приміщенні з метою виключення допоміжного забруднення плівки; перехід до індивідуального методу просочення і виключення повторного використання просочувальної рідини; старанне вакуумне сушіння на протязі 48 годин при температурі 95-105 °C; відмова від використання стабілізуючих епоксидних добавок. На основі цієї ізоляції створена серія імпульсних конденсаторів з плівки ПЕТ КЕ з питомою енергією 0,1, 0,2 та 0,3 Дж/г. Серія нараховує 32 типорозміри на напругу від 5 до 200 кВ і ємністю від 0,1 до 240 мкФ. Приведено приклад розробленого конденсатору КПИМ-50-6,6 на напругу 50 кВ і ємністю 6,6 мкФ з питомою енергією 0,3 Дж/г зі строком служби $9 \cdot 10^3$ імпульсів. Однак, не вказано режим роботи і надійність при такому ресурсі, що викликає деякі сумніви відносно серійного випуску такого типу конденсатору з такими високими питомими характеристиками. В роботі [25] приведена емпірична формула для визначення ресурсу цієї ізоляції від робочої напруги, температури, декременту коливань, часу заряду.

В інституті імпульсних процесів і технологій АН України (м. Миколаїв) досягнуті питомі енергії у кращих конденсаторів 135 і 181 Дж/дм³ при напрузі відповідно 100 і 6 кВ та ресурсі $6 \cdot 10^4$ і $2 \cdot 10^3$ імпульсів при розрядах близьких до аперіодичних. При цьому використана комбінована паперо-плівкова ізоляція товщиною 50-60 мкм з вмістом лавсанової плівки 50-60 %. Відзначається доцільність переходу на менші тонкі шари ізоляції 22-38 мкм, що сприяє підвищенню ресурсу, однак з більшими значеннями відхилень ресурсу [24]. За останні роки колектив цього інституту провів дослідження зі створення високовольтних імпульсних конденсаторів з різними видами полімерної ізоляції і просочених неполярною діелектричною рідиною. Отримані емпіричні залежності ресурсу для поліпропіленового, комбінованого поліпропілену – поліетилентерефталатного, полікарбонатно- поліетилентерефталатного діелектрика, які просочені фенілксилетаном, трансформаторним маслом Т-1500, поліметилсилоксановою рідиною ПМС-10 від напруженості електричного поля, частоти слідування імпульсів, частоти розрядного струму і декременту коливань. Випробування проведені при робочих напруженостях 173,6-183,8 кВ/мм. Досягнуті високі значення ресурсу порядку $(4-6) \cdot 10^5$ імпульсів на зразках секцій в режимі близькому до аперіодичного. Це відповідає теоретичному значенню питомої енергії в об'ємі активного діелектрику 350 Дж/дм³. Але значення питомої енергії для реально виготовленого погружного плівкового конденсатору за даними тих же авторів не перевищує 60 Дж/дм³. Практично не виявлено великої різниці між значеннями ресурсу для вказаних видів просочення неполярною рідиною. Просочення полімерної ізоляції традиційною полярною рідиною – касторовим маслом приводить до різкого зниження ресурсу [26]. Враховуючі велике значення впливу властивостей просочувальних рідин на ресурс конденсаторів значна увага приділяється їх дослідженню, в тому чи-

слі в взаємодії з полімерними діелектриками [23, 27, 28]. Наголошується на необхідності удосконалення методів очищення діелектричних рідин, сушіння і дегазації. Значно менший вплив на ресурс роблять різні домішки, такі як епоксидні та поверхньоактивні добавки [14, 29]. Так, наприклад [27], сушіння і дегація трансформаторного масла Т-1500 приводить до підвищення електричної міцності масла з 8 кВ/мм до 34 кВ/мм. Очищення фулеровою землею або активним окислом алюмінію приводить до підвищення електричної міцності масла з 34 кВ/мм до 35-36 кВ/мм.

Оскільки за останній час посилилась зацікавленість у використанні різних комбінацій діелектриків, виникла потреба в розрахунку електричного поля конденсаторних конструкцій з різними діелектриками. Особливо в крайових зонах з урахуванням електрофізичних якостей діелектриків, що визначило *тенденцію* більш поглибленого дослідження впливу розподілення електричного поля на ресурс імпульсних конденсаторів. В 90-х роках минулого сторіччя розроблено феноменологічну теорію руйнування конденсаторної ізоляції [30]. В основу теорії положено концепцію зворотно пропорційної залежності ресурсу від об'єму ізоляції, в якому напруженість електричного поля перевищує деяку критичну величину. На основі аналізу розподілення електричних полів, знайденого методом конформних відображень, та концепції «напруженого об'єму» отримано вирази для ресурсу в залежності від геометричних розмірів, форми торця обкладки, що дало змогу проводити прогнозування ресурсу до проведення випробувань. Подальший розвиток теоретичних розрахунків пов'язано з необхідністю урахування значень діелектричних проникностей і їх впливу на розподіл електричного поля. В роботах [31, 32] приведені результати чисельних розрахунків напруженості електричного поля поблизу скошеного краю обкладки з урахуванням шарів діелектрику та їх діелектричних проникностей. Розрахунки проведені методом граничних інтегральних рівнянь з оцінкою похибки розрахунків не більше 5 %. Дані рекомендації щодо вибору вузлів інтегрування при апроксимації границь розрахункової моделі відрізками з кусочно-постійними значеннями щільності зарядів. Показано, що найбільшу питому енергію мають конструкції з комбінованим діелектриком з мінімальним вмістом діелектрику, що має більшу діелектричну проникність та розташований біля обкладок. Надані пропозиції щодо спрощення урахування числа шарів при їх значній кількості.

Висновки.

1. Аналіз результатів досліджень в галузі створення високовольтних силових конденсаторів виявив такі тенденції їх розвитку: це тенденція створення чисто плівкових поліпропіленових конденсаторів змінної напруги з просоченням переважно фенілксилілетаном; тенденція удосконалення високовольтних імпульсних конденсаторів з паперовою або комбінованою ізоляцією, що просочені касторовим маслом, переважно для роботи в пристроях з тривалим ресурсом; тенденція створення високовольтних імпульсних конденсаторів з під-

вищеною питомою енергією з плівкової ізоляції (поліетилентерефталат та поліпропілен), що просочена неполярними діелектричними рідинами, та поліпшення якості цих рідин; тенденція дослідження впливу розподілення сильних електричних полів на ресурсні характеристики конденсаторної ізоляції та розробка методів прогнозування ресурсу за результатами досліджень.

2. Максимальні значення питомої енергії сучасних високовольтних імпульсних конденсаторів становлять 200-300 Дж/дм³ при ресурсі до 10⁴ імпульсів в найсприятливіших умовах експлуатації.

3. В Україні розробкою та виготовленням високовольтних імпульсних конденсаторів займаються науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «Молнія» НТУ «ХПІ» (м. Харків) та інститут імпульсних процесів і технологій НАН України (м. Миколаїв). Також виробляються вітчизняні діелектричні матеріали: поліпропіленова плівка (м. Луцьк) та конденсаторний папір (м. Малин Житомирської області).

Список літератури: 1. Зорін В.В. Функціонування та розвиток систем електропостачання міст // Науковий вісник: Енергетика та ресурсозбереження. – № 6 (32). – Харків: НТУ «ХПІ», 2008. – С. 33-46. 2. Галахова Л.Н. Косинусные высоковольтные конденсаторы с чисто пленочным диэлектриком и пропиткой экологически безопасными жидкостями // Электротехн. пром-ть: Сер. 04: Информ. – М.: Информэлектрон, 1988. – Вып. 4. – С. 1-8. 3. Кучинский Г.С., Галахова Л.Н. Выбор допустимых рабочих напряженностей в силовых конденсаторах с пропиткой экологически безопасными диэлектриками // Электричество. – 1999. – № 1. – С. 33-38. 4. Баранов М.И. Прогрессивные импульсные технологии обработки материалов: история, физические основы и технические возможности // Электротехника и электромеханика. – 2009. – № 1. – С. 42-54. 5. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хименко Л.Т. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. – Харьков: МОСТ-Торнадо, 2003. – 288 с. 6. Бойко Н.И., Борцов А.В., Евдошенко Л.С., Иванов В.М. и др. Использование импульсного коронного разряда с расширенной зоной ионизации для конверсии токсичных газообразных отходов // Электротехника и электромеханика. – 2007. – № 4. – С. 64-65. 7. Жекул В.Г., Барабашова Г.А., Дубовенко К.В. и др. Электрические и гидродинамические характеристики разряда при импульсной обработке водяных скважин // Вісник Національного технічного університету «ХПІ» «Електроенергетика і перетворююча техніка». – Харків: НТУ «ХПІ», – 2004. – № 35. – С. 197-203. 8. Попова И.В., Маринин А.И., Украинцев А.И. и др. Получение фруктово-олигосахаридных смесей с помощью электроимпульсных технологий // Электронная обработка материалов. – 2007. – № 2. – С. 60-66. 9. Монастирський Г.Е., Шпак А.П., Коломийцев В.І., Щерба А.А. та ін. Дослідження стану порошків, отриманих електроіскровим методом із сплавів з мартенситним перетворенням // Металлофізика і новітні технології. – 2003. – Т. 25, № 6. – С. 803-816. 10. Бойко Н.И., Евдошенко Л.С., Зароченцев А.И., Иванов В.М. Высоковольтные установки и технологии на основе комплекса высоковольтных импульсных воздействий // Вісник Національного технічного університету «ХПІ» «Електроенергетика та перетворююча техніка». – Харків: НТУ «ХПІ», – 2004. – № 35. – С. 54-63. 11. Баранов М.И. Ретроспектива, современное состояние и перспективы развития исследований в области создания электроустановок с мощными накопителями электрической и магнитной энергии // Электротехника и электромеханика. – 2007. – № 5. – С. 48-60. 12. Кучинский Г.С. Высоковольтные импульсные конденсаторы. – Л.: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1979. – 224 с. 13. Рудаков В.В., Кравченко В.П. Пути улучшения удельных характеристик высоковольтных импульсных конденсаторов // Вісник НТУ «ХПІ» «Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2001. – № 16. – С. 102-105. 14. Ермилов И.В. Высоковольтные импульсные конденсаторы с полимерной изоляцией // Электричество. – 2006. – № 9. – С. 73-79. 15. В.В.Рудаков, Ю.В.Кравченко. Ресурс пленочной полипропиленовой изоляции, пропитанной нефтяным маслом, в импульсном режиме // Вісник НТУ «ХПІ» «Техніка і електрофізика високих напруг». – 2007. – № 20. – С. 167-174. 16. Саушкин А.В., Жарова Н.В., Ким А.А. и др. Малогабаритный низкочастотный конденсатор с импульсной зарядкой на 200 кВ // Приборы и техника эксперимента. – 2006. – № 4. – С. 91-95. 17. Гребенников И.Ю., Гунько В.И., Дмитришин А.Я. и др. Исследование зависимости

ресурса высоковольтных импульсных конденсаторов с пленочным диэлектриком от режима эксплуатации // Электротехника. – 2006. – № 6. – С. 38-41. **18. Рудаков В.В., Беспалов В.Д., Золотухин А.Н., Дубийчук О.Ю.** Надежность и удельные характеристики высоковольтных импульсных конденсаторов // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. Проблеми сучасної електротехніки. Частина 6. – 2002. – С. 89-93. **19. Рудаков В.В., Дубийчук О.Ю., Крамчанин Е.Г. и др.** Особенности конструирования высоковольтных импульсных конденсаторов с последовательным соединением секций // Вісник НТУ «ХПІ» «Техніка і електрофізика високих напруг». – 2006. – № 37. – С. 119-127. **20. В.В.Рудаков, О.Ю.Дубийчук.** Выбор рациональной конструкции высоковольтных импульсных конденсаторов с последовательным соединением секций // Материалы 13-й Международной научной школы-семинара «Физика импульсных разрядов в конденсированных средах» (Август 2007). – Николаев, 2007. – С. 130-131. **21. Жарова Н.В., Ратахин Н.А., Саушкин А.В. и др.** Быстрый вывод энергии из сильноточного импульсного конденсатора с помощью псевдоискрового разрядника // Приборы и техника эксперимента. – 2006. – № 3. – С. 96-99. **22.** Расчет эксплуатационных характеристик и применение электрических конденсаторов / Б.П. Беленький, П.Н. Бондаренко, М.Э. Борисова и др. – М.: Радио и связь, 1988. – 240 с. **23. Гунько В.И., Онищенко Л.И., Гребенников И.Ю. и др.** Исследование влияния повышенных температур и давления на электрическую прочность полиметилсилоксановой жидкости ПМС-20 и касторового масла, насыщенных элегазом // Электротехника. – 2008. – № 7. – С. 59-61. **24. Онищенко Л.И., Гунько В.И., Гребенников И.Ю. и др.** Емкостные накопители энергии для электрофизических устройств различного назначения // Электротехника. – 2001. – № 8. – С. 55-57. **25. Ермилов И.В.** Современные импульсные конденсаторы с пленочным диэлектриком // Электронные компоненты. – 2005. – № 4. **26. В.В.Рудаков, Ю.В.Кравченко, Д.А.Доценко.** Ресурс пленочной полипропиленовой изоляции, пропитанной касторовым маслом, в импульсном режиме // Вісник НТУ «ХПІ» «Техніка і електрофізика високих напруг». – 2006. – № 37. – С. 113-118. **27. Гребенников И.Ю., Гунько В.И., Дмитришин А.Я. и др.** Исследование способов очистки трансформаторного масла для пропитки высоковольтных импульсных конденсаторов с пленочным диэлектриком // Электротехника. – 2007. – № 1. – С. 25-27. **28. Андреев А.М., Канискин В.А., Полонский Ю.А.** Исследование старения электроизоляционных материалов силовых кабелей и конденсаторов // Электричество. – 1999. – № 1. – С. 39-44. **29. Беспалов В.Д., Рудаков В.В., Кашицкая Ю.В. и др.** Исследование бумажно-пленочного диэлектрика, пропитанного касторовым маслом с добавкой поверхностно-активного вещества // Вісник національного технічного університету «ХПІ» «Електроенергетика і перетворююча техніка». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2006. – № 7. – С. 58-63. **30. Рудаков В.В.** Механизм разрушения конденсаторной изоляции // Техническая электродинамика. – 1998. – № 6. – С. 10-15. **31. Кравченко Ю.В., Рудаков В.В.** Распределение электрического поля у края обкладки конденсатора с произвольным наклоном грани торца // Техническая электродинамика. Тематический выпуск. – 2008. – Ч. 4. – С. 129-132. **32. В.В.Рудаков, Ю.В.Кравченко, В.О. Лысенко.** «Краевой эффект» у скошенного края электрода // Вісник НТУ «ХПІ» «Техніка і електрофізика високих напруг». – 2007. – № 34. – С. 85-92.

Надійшло до редколегії 09.10.2009

УДК 621.317.3

В.В.РУДАКОВ, докт.техн.наук, проф., НТУ «ХПІ»;
А.И.КОРОБКО, канд.техн.наук, вед.науч.сотр., НТУ «ХПІ»;
А.А.КОРОБКО, студент, НТУ «ХПІ»

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ В ЭМУЛЬСИЯХ ТИПА МИНЕРАЛЬНОЕ МАСЛО – ВОДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭМУЛЬСИИ ИНЖЕНЕРНОГО ТИПА

В статті наведені результати експериментальних досліджень діелектричного метода визначення вмісту води в емульсіях типу мінеральне масло – вода з використанням електрофізичної моделі емульсії інженерного типу.

In article results of experimental researches of a dielectric method of definition of moisture content in type mixes mineral oil – water with use of electrophysical model of a mix of engineering type are stated.

Цель работы. Экспериментальная проверка корректности диэлектрического метода определения влагосодержания, базирующегося на инженерной методике определения электрофизических характеристик эмульсии типа минеральное масло – вода.

Экспериментальная часть. Для проверки корректности инженерного подхода к разработке диэлектрического метода определения влагосодержания в эмульсиях типа минеральное масло – вода, описанного в статье данного сборника: В.В.Рудаков, А.И.Коробко, А.А.Коробко «Электрофизическая модель эмульсии типа минеральное масло – вода инженерного типа» была проведена его экспериментальная проверка.

При этом проводились исследования на эмульсии типа трансформаторное масло – вода.

Для проведения экспериментальных исследований по определению влагосодержания в данной эмульсии был использован диэлектрический метод [1], базирующийся на определении зависимости от объемного содержания воды к общему объему эмульсии диэлектрической проницаемости $\epsilon_{эм}$.

Для определения $\epsilon_{эм}$ был разработан измерительный комплекс, блок – схема, которого представлена на рис.1.

В состав измерительного комплекса входят:

- измерительный преобразователь 1 емкостного типа;
- измерительный генератор 2;
- средства измерения и контроля, электронный частотомер 3 (ЧЗ-34) и электронный осциллограф 4 (С1-55).

Общий вид измерительного комплекса представлен на рис. 2.

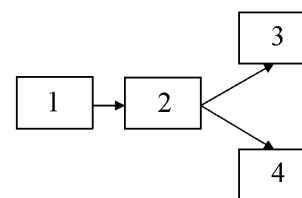


Рисунок 1 –Блок-схема измерительного комплекса

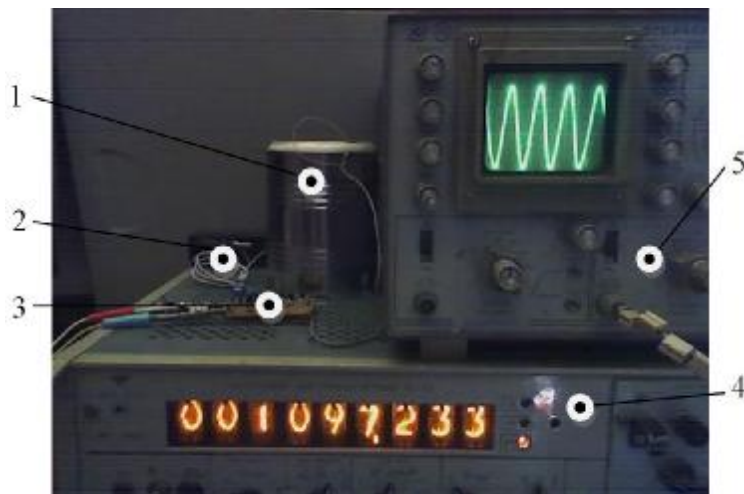


Рисунок 2 – Общий вид измерительного комплекса:

1 – измерительный преобразователь, 2 – питание 12В, 3 – измерительный генератор, 4 – частотомер ЧЗ-34, 5 – осциллограф С1-55

В качестве измерительного преобразователя был использован плоский конденсатор диаметром 50 мм с межэлектродным расстоянием 2 мм, заполненный исследуемой эмульсией. Для уменьшения влияния приэлектродных процессов на точность эксперимента электроды конденсатора были выполнены из нержавеющей стали, а переменное напряжение на его обкладках не превышало 200 мВ (существенно меньше гальванической разницы потенциалов).

Измерительный преобразователь подсоединялся к измерительному генератору, который представляет собой электронный генератор с самовозбуждением [2], эквивалентная схема колебательного контура представлена на рис. 3.

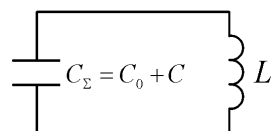


Рисунок 3 – Эквивалентная схема колебательного контура измерительного генератора

Измерительный генератор обеспечивает постоянство амплитуды высокочастотного сигнала на измерительном преобразователе и устойчивую генерацию в диапазоне частот от 50 кГц до 2,8 МГц. При этом коэффициент гармоник сигнала на измерительном преобразователе не превышает 5 %, что обеспечивало практически синусоидальную (гармоническую)

форму сигнала, амплитудно – временные параметры которого контролировались с помощью осциллографа С1-55.

Величина емкости C_{Σ} определяется суммой емкостей «чистого» измерительного преобразователя C и паразитной емкостью C_0 , являющейся входной емкостью измерительного генератора.

С учетом пренебрежения потерями в этом контуре, его резонансная частота

та ν определяется известной формулой Томпсона [3]:

$$\nu = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC_{\Sigma}}} \quad (1)$$

В свою очередь величина C определяется исключительно геометрической емкостью измерительного преобразователя C_{Γ} и величиной $\epsilon_{см}$: $C = C_{\Gamma} \cdot \epsilon_{см}$. Величины C_{Γ} , L и C_0 – конструктивные константы данного измерительного преобразователя.

Для инструментального определения неизвестных C_{Γ} , L и C_0 были проведены предварительные эксперименты:

- определена резонансная частота ν_1 , которая соответствует случаю, когда измерительный преобразователь отключен и в контуре включена только паразитная емкость C_0 ;
- определение резонансной частоты ν_2 , которая соответствует случаю, когда измерительный преобразователь подключен к измерительному генератору и заполнен чистым трансформаторным маслом.

С учетом вышеизложенного, а также принимая во внимание результаты вышеназванной статьи, влагосодержание W определяется следующим образом:

$$W = \frac{1/\nu^2 - 1/\nu_2^2}{3(1/\nu_2^2 - 1/\nu_1^2)}, \quad (2)$$

где ν – резонансная частота для исследуемой эмульсии.

Для измерения ν_1 , ν_2 и ν были сделаны по 10 измерений в точках $W = 0$ (для ν_1 , ν_2) и в точках $W = 0$; 5 %; 10 %; 20 %.

Водомасляная эмульсия приготавливалась путем механического перемешивания в высокоскоростном миксере заранее отмеренных объемных частей воды и трансформаторного масла.

Обработанные экспериментальные результаты исследований в сопоставлении с теоретическими результатами, соответствующими модели эмульсии инженерного типа, приведенной ранее, представлены на рис. 4.

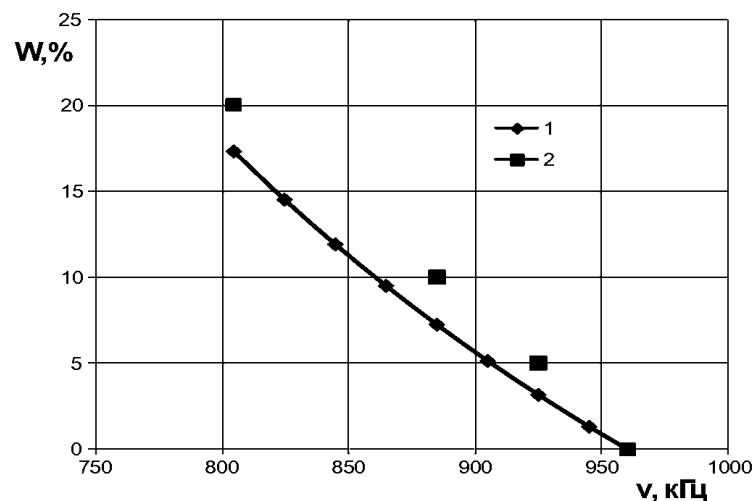


Рисунок 4 – График зависимости влагосодержания от частоты:
1 – теоретическая зависимость, 2 – экспериментальные данные

Как видно из сопоставленных теоретических и экспериментальных данных, наблюдается удовлетворительное их совпадение. Так рассогласование теоретических и экспериментальных данных не превышает 13 % для $W = 20$ %; 27 % для $W = 10$ %; и 36 % для $W = 5$ %.

Полученные величины рассогласований между теоретическими и экспериментальными данными можно объяснить как несовершенством теоретической модели инженерного типа, так и возможным наличием воздуха, попавшего в эмульсию в процессе ее приготовления.

Указанные причины определяют направления дальнейших исследований по данному направлению.

Выводы. По результатам теоретических и экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Упрощенная теоретическая модель обеспечивает удовлетворительную точность, относительную погрешность не превысила 36 % в диапазоне концентраций 0-5 %, что позволяет использовать разработанный метод для экспресс диагностики трансформаторного масла в электротехнике.

2. В диапазоне концентрации 5-20 % разработанный метод позволяет оперативно определить влагосодержание в сильно обводненных эмульсиях, что позволяет использовать данный метод для экспресс оценки влагосодержания топливных эмульсий типа мазут-вода применяемых в электроэнергетике.

Список литературы: 1. Пешков Н.П., Коровский М.Я. Применение метода частотной модуляции для измерения малых содержаний воды в авиационных топливах // Тр. Рижского Краснозн. инсти-

тута инженеров гражданской авиации. – Рига, 1970. – Вып. 166. – С. 66-71. 2. Мелешико Е.А. Наносекундная электроника в экспериментальной физике. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – С. 12-14. 3. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. 5-е изд. – М.: Наука» 1971. – 939 с.

Поступила в редколлегию 16.11.2009

УДК 621.317.3

В.В.РУДАКОВ, докт.техн.наук, проф., НТУ «ХПИ»;
А.И.КОРОБКО, канд.техн.наук, вед.науч.сотр., НТУ «ХПИ»;
А.А.КОРОБКО, студент, НТУ «ХПИ»

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭМУЛЬСИИ ТИПА МИНЕРАЛЬНОЕ МАСЛО – ВОДА ИНЖЕНЕРНОГО ТИПА

В статті розглянуті питання щодо визначення кількості води в системі мінеральне масло – вода діелектричним методом. Також наведена теоретична модель, яка описує принцип дії даного пристрою.

In the article the considered questions are in relation to determining the amount of water in the mixes mineral oil – water by a dielectric method. A theoretical model which describes principle of action of this device is also considered.

Введение. В настоящее время существует четкая тенденция востребованности эффективных технологий определения различных параметров диэлектрических жидкостей на органической основе [1-3]. Возникновение таких тенденций вызвано, с одной стороны, повышением стоимости очистки технических масел и, с другой стороны, применением эмульсий, типа мазут-вода в качестве топлива в электротехнике.

Особенно актуальными являются технологии экспресс определения содержания вода в энергетических и топливных маслах минерального типа.

Среди экспресс технологий определения влагосодержания наибольшее распространение получил диэлектрический метод анализа, основанный на определении диэлектрических характеристик эмульсии [4,5].

Однако широкому распространению данного метода анализа препятствует тот факт, что известные электрофизические модели эмульсии типа минеральное масло – вода, являются крайне сложными для инженерного их применения и, тем более, для целей экспресс анализа.

Цель работы. Разработка упрощенной электрофизической модели эмульсии типа минеральное масло – вода, позволяющей эффективно использовать диэлектрический метод анализа влагосодержания в инженерных целях, в том числе для проведения экспресс - анализа влагосодержания.

Описание моделей. В классическом представлении, минеральное масло содержащее воду представляет собой эмульсию в виде гетерогенной системы, которая состоит из двух жидкостных фаз, причем одна из них (вода) диспергирована в виде капелек в другой (масло) [6].

В случае если капли воды имеет вид сфер или эллипсов вращения (рис. 1), а их размеры по обем осям меньше чем расстояние между ними, диэлектрическая проницаемость смеси $\epsilon_{см}$ определяется выражением [6]:

$$\epsilon_{\bar{n}i} = \epsilon_i \left(1 + W \frac{\epsilon_d - \epsilon_i}{\epsilon_i + n(\epsilon_d - \epsilon_i)} \right), \quad (1)$$

где: ϵ_m – диэлектрическая проницаемость масла; ϵ_d – диэлектрическая проницаемость воды; W – концентрация воды в эмульсии (соотношение объемов воды к общему объему эмульсии); n – коэффициент деполяризации.

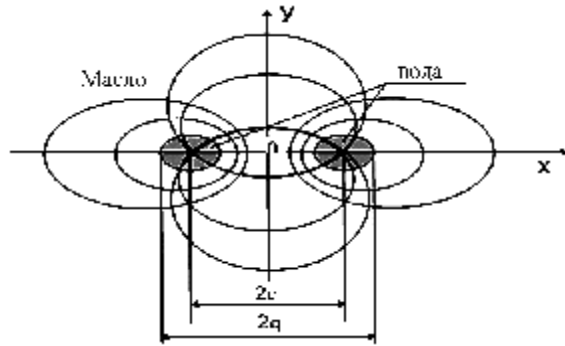


Рисунок 1 – Электрофизическая модель эмульсии трансформаторное масло – вода

Инженерное применение электрофизической модели эмульсии, которая описывается выражением (1) в практических целях, в частности, для целей экспресс анализа, содержания воды в эмульсиях типа минеральное масло – вода крайне затруднительно по следующим причинам.

1. Коэффициент деполяризации n в выражении (1) зависит как от величины W , так и от электрофизических свойств воды входящей в состав эмульсии.

2. Величина диэлектрической проницаемости воды ϵ_d по своей сути есть комплексная величина, зависящая как от электрофизических свойств воды, входящей в состав эмульсии, так и от частоты.

3. От величины $\epsilon_{см}$ зависит частота колебаний измерительного генератора, с помощью которого в диэлектрическом методе определения влагосодержания и проводится определение $\epsilon_{см}$, в дальнейшем, величины W .

Исходя из того, что ни электрофизические свойства воды, входящей в состав эмульсии, ни величина частоты колебаний, неизвестны заранее, использование модели, описываемой выражением (1) для инженерных целей крайне затруднительно.

Именно по этим причинам была разработана максимально упрощенная электрофизическая модель эмульсии типа минеральное масло – вода, свободная от указанных недостатков (рис. 2).

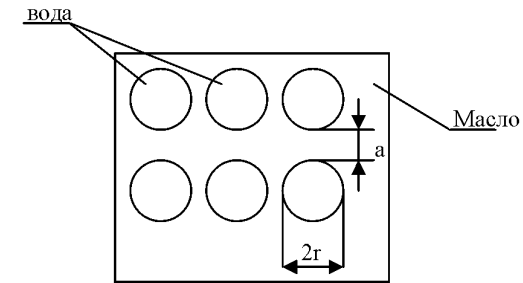


Рисунок 2 – Электрофизическая модель эмульсии трансформаторное масло – вода инженерного типа

При разработке упрощенной модели были использованы следующие предпосылки и допущения.

1. Исходя из того, что $\epsilon_d \gg \epsilon_m$, ($\epsilon_d \approx 81$; $\epsilon_m \approx 2,2$) отдельные капли воды в эмульсии заменены идеально проводящими шарами радиуса r , находящимися на расстояниях a друг от друга и равномерно распределены по объему эмульсии, при $a > r$.

2. Из-за того, что шары, заменяющие водную фазу в эмульсии, являются идеально проводящими, их эквивалентная диэлектрическая проницаемость не зависит от частоты в статическом приближении и равна $\epsilon_d = \infty$.

При этом упрощенная модель эмульсии преобразуется в известную электрофизическую систему типа искусственного диэлектрика, широко применяемого в антенной технике [7] и имеющую точные замкнутые решения.

Для этой системы при статических полях или достаточно низких частотах величина $\epsilon_{см}$ определяется выражением [7]:

$$\epsilon_{\bar{n}i} = \epsilon_i + N_0 k = \epsilon_i \left(1 + \frac{N_0 k}{\epsilon_i} \right), \quad (2)$$

где N_0 – число поляризуемых частиц (шаров) в единице объема смеси; k – средняя поляризуемость частиц.

Для случая сферической симметрии в [7] приведено точное выражение:

$$k = 4\pi r^3 \epsilon_i. \quad (3)$$

Принимая во внимание, что: $N_0 = \frac{3V_A}{4\pi r^3 V_{Ni}}$,

где: V_B и V_{CM} – объемы «водной» фазы и эмульсии соответственно ($V_B/V_{CM} = W$), получаем конечные выражения для $\epsilon_{см}$:

$$\epsilon_{\bar{n}i} = \epsilon_i (1 + 3W). \quad (4)$$

В статье данного сборника: В.В.Рудаков, А.И.Коробко, А.А.Коробко «Диэлектрический метод определения влагосодержания в эмульсиях типа минеральное масло – вода с использованием электрофизической модели эмульсии инженерного типа» приведены результаты экспериментальной проверки корректности полученных теоретических результатов. Полученные величины расхождений теоретических и экспериментальных значений свидетельствуют о применимости данного подхода в инженерной практике.

Заключение. Полученные соотношения для диэлектрической проницаемости эмульсии предельно просто описывают разработанную упрощенную электрофизическую модель эмульсии типа минеральное масло – вода и позволяют использовать их в инженерных целях для экспресс определения влагосодержания в энергетических, электротехнических и пищевых маслах.

Список литературы: 1. Болога М.К., Берилл И.И. Рафинация подсолнечного масла в электрическом поле. – Кишинэу: «Stiinta», 2004. – 216 с. 2. Коробко А.И. Эффективная электрофильтровая система очистки трансформаторного масла // Сборник «Физические и компьютерные технологии». 11-я Международная научно-техническая конференция, Харьков: ХНПК «ФЭД».- 2-3 июня 2005 г. – С. 362-364. 3. Гуназа С.А. О совершенствовании эксплуатации энергетических масел. Интернет: <http://www.inventors.ru/index.asp?mode=800>. 4. Кочанов Э.С., Кочанов Ю.С., Скачков А.Е. Электрические методы очистки и контроля судовых топлив. – Л.: Судостроение, 1990. – 216 с. 5. Теория и практика экспертного контроля влажности твердых и жидких материалов / Под. ред. Кричевского Е.С. – М.: Энергия, 1980. – 240 с. 6. Панченков Г.М., Цабек Л.А. Поведение эмульсий во внешнем электрическом поле. – М.: Химия, 1969. – 190 с. 7. Айзенберг Г.В. и др. Антенны УВК / Под ред. Г.В.Айзенберга. Ч. 1. – М.: Связь, 1977. – С. 299-300.

Поступила в редколлегию 16.11.2009

УДК 621.3

С.С.РУДЕНКО, магистрант, НТУ «ХПИ»;
А.А.ПЕТКОВ, канд.техн.наук, ст.науч.сотр., НТУ «ХПИ»

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ РЕЗИСТОРОВ ТВО-60

У роботі наведені експериментальні криві розігріву високовольтного резистора ТВО - 60. Показано розподіл відносної температури по поверхні резистора. Визначені теплофізичні характеристики резистора.

Experimental heating curves of high-voltage resistor TBO - 60 are given in the paper. The distribution of relative temperature on the resistor surface is shown. Thermal physics characteristics of the resistor are determined.

Постановка проблемы. Для испытания электротехнического и электронного оборудования на стойкость и воздействие электромагнитных факторов различного происхождения применяются высоковольтные импульсные испытательные установки (ВИИУ).

Одним из элементов, входящим в состав ВИИУ, являются высоковольтные резисторы. Они используются в качестве составляющих систем заряда и защиты емкостных накопителей энергии (ЕНЭ), а также в качестве формирующих элементов, обеспечивающих коррекцию формы создаваемых импульсных испытательных воздействий. В зависимости от функционального назначения резистора к его конструкции предъявляются различные требования. Однако общим требованием для всех типов резисторов является устойчивость их конструкции к тепловому воздействию тока, протекающему через резистор в процессе эксплуатации.

Анализ публикаций. В работе [1] был рассмотрен процесс нагрева резисторов, и приведены методы теплового расчета проволочного и жидкостного резисторов. Показано, что если ток, проходящий через резистор, изменяется скачком от 0 до I , то температура нагрева поверхности резистора определяется по соотношению:

$$T = T_0 + \frac{I^2 R}{\alpha S} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \quad (1)$$

где T_0 – начальное значение температуры поверхности резистора; I – действующее значение тока; R – сопротивление резистора; α – коэффициент теплоотдачи; S – площадь поверхности резистора; t – время протекания тока; τ – постоянная времени нагрева.

Постоянная времени нагрева определяется по формуле:

$$\tau = \frac{cm}{\alpha S}, \quad (2)$$

где c – удельная теплоемкость сопротивления; m – масса резистора.

В [2] представлены экспериментальные данные по перегрузочной способности и теплофизические характеристики (ТФХ) резисторов, нашедших применение в высоковольтной технике: ТВО-1, ТВО-2, ТВО-5, ТВО-20 и ПЭВ-15. Описана методика проведения испытания мощных резисторов.

В работе [3] были определены ТФХ резисторов типа С 5-5 с номинальной мощностью в 1, 2, 5, 8 и 10 Вт.

Результаты испытаний резисторов ТВО-10-27 Ом при воздействии импульсных токов приведены в [4]. В работе получены количественные оценки показателей надежности работы резисторов при различных режимах импульсного нагрева.

В приведенных публикациях рассмотрены тепловой расчет, перегрузочная способность и оценка надежности ряда мощных высоковольтных резисторов, как промышленного так индивидуального выполнения, а также экспериментальное определение их ТФХ. Однако, как видно из приведенного анализа, вопросы теплового расчета резисторов ТВО-60, используемых в ВИИУ с большой запасаемой энергией [5], не нашли должного отражения в литературных источниках, что вызвало необходимость дальнейших исследований для построения обобщенных методов расчета высоковольтных резисторов [6].

Целью настоящей работы является определение теплофизических характеристик высоковольтных резисторов типа ТВО-60.

Материалы и результаты исследований. Экспериментальные исследования проводились по известной методике [1–3]. Исследуемый резистор подключался к источнику переменного напряжения (см. рис. 1) и через определенные промежутки времени фиксировалась температура поверхности резистора.

Экспериментальная установка (рис. 1) состоит из следующих устройств: лабораторный автотрансформатор Т1, амперметр А1 для измерения тока протекающего через резистор, вольтметр V1 для измерения напряжения прикладываемого к резистору, БТЭП – блока термоэлектрических преобразователей (ТЭП) дифференциального соединения ТЭП J1, J2, и вольтметра V2, регистрирующего значения ЭДС на ТЭП.

Величина подводимой мощности устанавливалась с помощью регулирования напряжения автотрансформатором Т1 и фиксировалась с помощью приборов V1 и А1. Подводимая мощность определялась как произведение приложенного к резистору напряжения на протекающий ток

$$P = UI, \quad (3)$$

где U – действующее значение напряжения, приложенного к резистору; I – действующее значение тока протекающего через резистор.

Для измерения температуры использовались ТЭП типа алюмель-хромель.

В процессе исследований резистор закреплялся горизонтально. Измерение температуры проводилось в точках, показанных на рис. 2, а также в центрах остальных боковых поверхностей. При проведении экспериментов, поверхность, показанная на рис. 2, была обращена вверх.

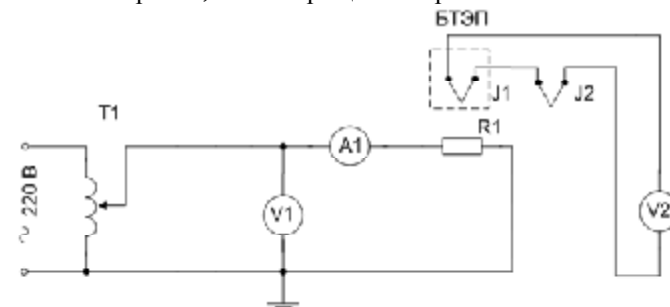


Рисунок 1 – Электрическая схема измерительной установки

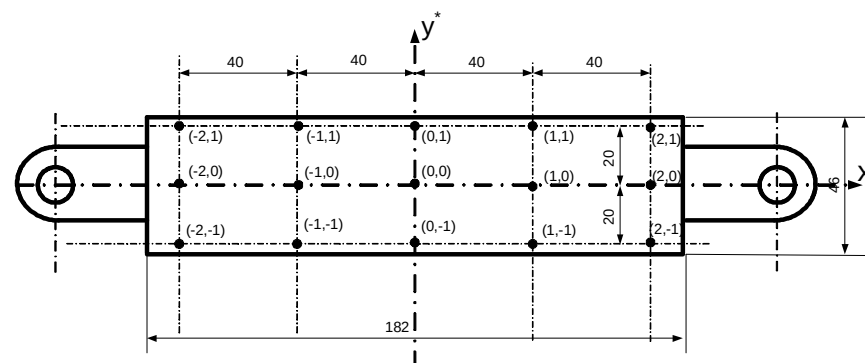


Рисунок 2 – Расположение исследуемых точек на резисторе ТВО – 60

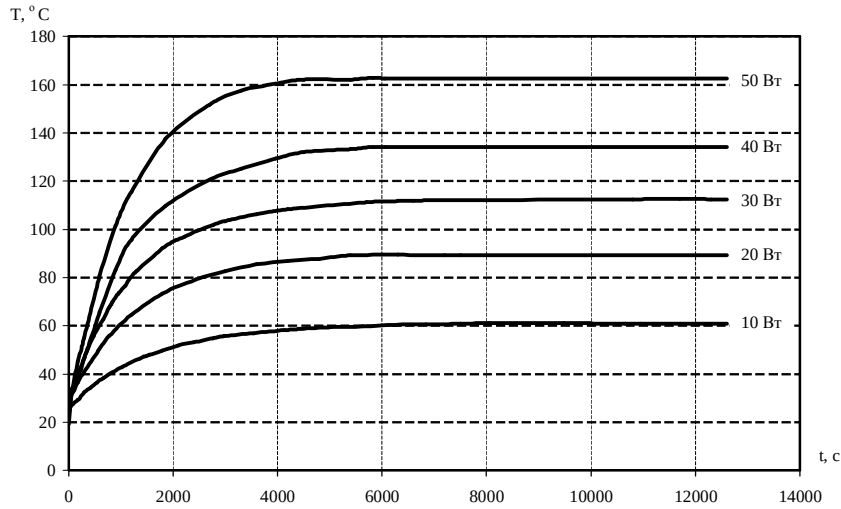


Рисунок 3 – Экспериментальные кривые разогрева резистора ТВО – 60

На рис. 3 приведены экспериментальные кривые нагрева резистора ТВО–60–51Ом при подводимых мощностях 10, 20, 30, 40 и 50 Вт. В течение экспериментов отклонение от приведенных значений мощности не превышало 3%. Приведенные кривые были сняты в точке с координатами (0,0).

На рис. 4 показаны графики распределения температуры по поверхности резистора в точках, показанных на рис. 2. Графики распределения построены для подводимой мощности $P = 10$ Вт в относительных координатах, определяемых по следующим соотношениям:

$$x^* = x/40; \quad (4)$$

$$y^* = y/20; \quad (5)$$

$$T^* = T(x^*, y^*)/T(0,0), \quad (6)$$

где x^*, y^* – относительные координаты; x, y – физические координаты в мм; T^* – относительная температура; $T(x^*, y^*)$ – температура, зафиксированная в точке (x^*, y^*) ; $T(0,0)$ – температура в центре исследуемой поверхности резистора.

Для определения коэффициента теплоотдачи α воспользуемся соотношением (1) при $t \rightarrow \infty$, что соответствует установлению баланса между выделяющейся в резисторе энергией и энергией, отдаваемой поверхностью резистора во внешнюю среду. В этом случае

$$\alpha = \frac{P}{S(T_y - T_0)}, \quad (7)$$

где $P = UI = I^2 R$ – подводимая мощность; T_y – установившееся значение температуры (см. рис. 3).

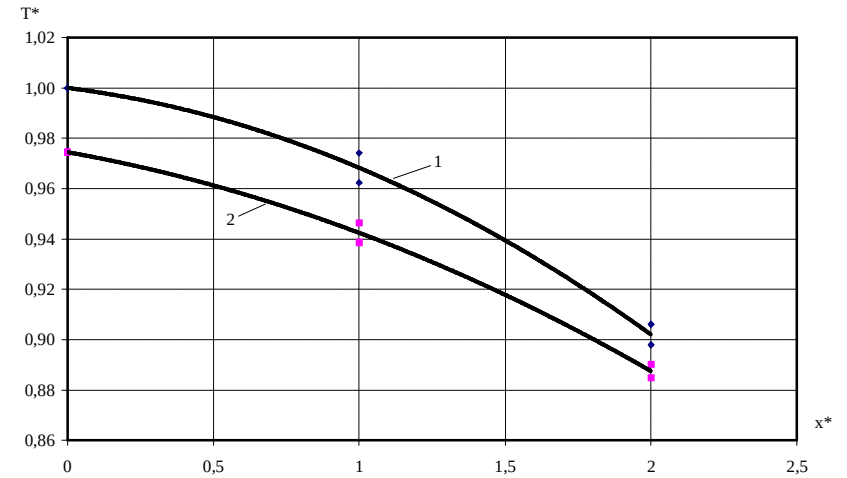


Рисунок 4 – Изменение относительной температуры: 1 – при $y^* = 0$; 2 – при $y^* = \pm 1$

Как видно из рис. 4, различие температуры точек поверхности достигает 12%, поэтому, в качестве установившегося значения температуры поверхности T_y , принималось усредненное значение. Усреднение температуры производилось несколькими способами.

По первому варианту T_y определялась, как среднее арифметическое четырех значений в центрах боковых граней резистора.

$$T_y = \sum_{j=1}^4 T_j / 4, \quad (8)$$

где T_j – температура в центре j -ой боковой грани.

Во втором варианте в качестве T_y принималась средне взвешенная величина:

$$T_y = \sum_{j=1}^4 T_j S_j / \sum_{j=1}^4 S_j, \quad (9)$$

где T_j и S_j – соответственно температура в центре j -ой боковой грани и ее площадь.

Для определения T_y по 3-м и 4-м варианту было использовано распределение относительной температуры по одной из поверхности резистора (см. рис. 4).

В третьем варианте площадь больших граней резистора была разбита на прямоугольные площадки с центрами в точках $(-2,0)$, $(-1,0)$, $(0,0)$, $(1,0)$ и $(2,0)$, расположенных на оси x^* (см. рис.2). Вычисление T_y производилось по формуле (8) с учетом того, что температура этих граней определялась как

$$T_j = \sum_{k=1}^5 T_k^* T_j^0 S_k / S_j, \quad (10)$$

где T_k^* – относительная температура в k -ой точке; T_j^0 – температура в центре j -ой грани; S_k – площадь прямоугольной площадки с центром в k -ой точке; S_j – площадь j -ой грани.

В четвертом варианте площадь больших граней резистора разбита на прямоугольные площадки с центрами в точках, показанных на рис. 2. Вычисление T_y производилось по формуле (8) с учетом того, что температура этих граней определялась как

$$T_j = \sum_{k=1}^{15} T_k^* T_j^0 S_k / S_j. \quad (11)$$

Учитывая, что ни один из рассмотренных вариантов не может претендовать на абсолютную точность, значение T_y , вычисленные по ним, в дальнейшем рассматривались как выборка случайной величины.

Результаты расчета коэффициента теплоотдачи α , выполненные с использованием (8)–(11) показаны на рис. 5. Как видно из рисунка, в интервале рабочих температур коэффициент теплоотдачи изменяется до 30 %.

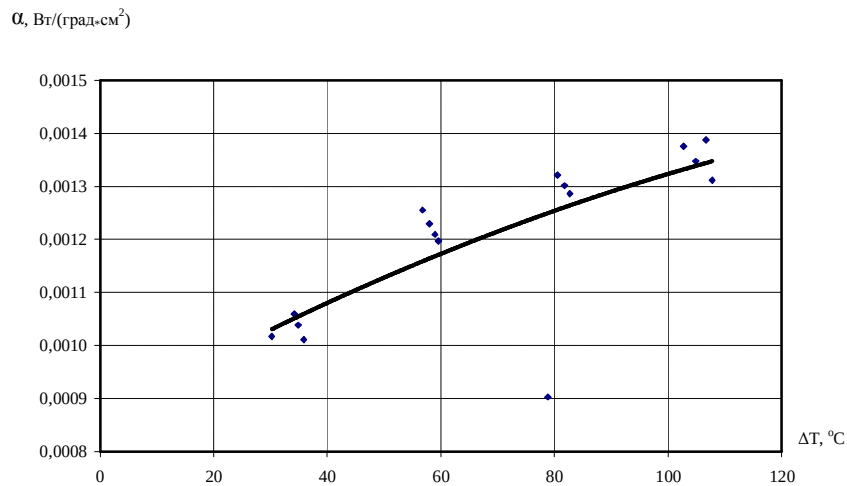


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента теплоотдачи α от перегрева резистора

Средняя теплоемкость резистора может быть определена из выражения (2) как

$$cm = \tau \alpha S. \quad (12)$$

Проведенные по (12) расчеты, при принятии гипотезы о постоянстве средней теплоемкости в процессе нагрева, позволили получить следующее ее

значение

$$cm = 380,62 \text{ Дж/град},$$

и среднее квадратическое отклонение

$$\sigma_{cm} = 2565 \text{ Дж/град}.$$

Выводы.

- 1 В работе получены экспериментальные кривые разогрева резистора ТВО-60 при подводимых мощностях 10, 20, 30, 40 и 50 Вт, позволяющие рассчитать теплофизические характеристики резистора.
- 2 Определено распределение температуры по большей грани резистора.
- 3 Установлено, что величина теплоемкости резистора ТВО-60 находится в интервале значений $(380,6 \pm 76,5)$ Дж/град.
- 4 Построена зависимость коэффициента теплоотдачи от перегрева резистора.

Полученные в работе данные могут быть использованы для проведения электротеплового расчета резисторов ТВО-60 при длительном протекании тока и оценки нагрева их поверхности при импульсных режимах работы.

Список литературы: 1. Смирнов С.М. Генераторы импульсов высокого напряжения : монография / С.М.Смирнов, П.В.Терентьев. – М.-Л.: Энергия, 1964. – 240 с. 2. Зинкевич Н.М. Перегрузочная способность резисторов / Зинкевич Н.М. // Электронная техника. – 1970. – № 1. – С. 73-83. 3. Караев Г.С. Способ экспериментально-расчетного определения тепловых параметров резисторов / Г.С.Караев, В.А.Квятковский, В.А.Ловков // Электронная техника. – 1980. – С. 24-26. 4. Петков А.А. Усовершенствование разрядных цепей генераторов больших импульсных токов с учетом критериев их надежности: дис. на соискание учен. степени канд.техн.наук: спец. 05.09.13 «Техника сильных электрических и магнитных полей» / Петков А.А.; Национальный технический университет «ХПИ». – Харьков, 2004. – 205 с. 5. Баранов М.И. Предельные характеристики по рассеиваемой импульсной мощности и энергии высоковольтных керамических объемных резисторов типа ТВО – 60 / Баранов М.И., Бочаров В.А., Носенко М.А. // Вестник Национального технического университета «ХПИ». Сборник научных трудов. Тематический выпуск: Техника и электрофизика высоких напряжений. – Харьков: НТУ «ХПИ». – № 20. – 2007. – С. 45-55. 6. Руденко С.С. Тепловые процессы в резисторах при протекании импульсных токов / С.С. Руденко, А.А. Петков // III Університетська науково-практична студентська конференція магістрантів Національного технічного університету «ХПІ» (14-16 квітня 2009 року): тези доповідей. – Ч. 2. – Харків: НТУ «ХПІ», – 2009. – С. 114-116.

Поступила в редакцию 07.11.2009

УДК 621.396.2

А.А.СЕРКОВ, докт.техн.наук, профессор, НТУ «ХПИ»;
Н.Ф.ЛОГВИНЕНКО, канд.техн.наук, доцент, ХНУВД, Харьков

РАЗРАБОТКА ПОДХОДОВ К СОЗДАНИЮ ТЕОРИИ ЦЕННОСТИ ИНФОРМАЦИИ

На ґрунті проведеного системного аналізу розглянуто теоретичний, методологічний, системний та

практичний аспекти оцінки цінності інформації. Сформульовано вимоги до побудови теорії цінності інформації із відокремленням найбільш актуальних напрямків.

On base called on system analysis are considered theoretical, methodological, system and practical aspects of the estimation of value to information. The Worded requirements to building of the theories of value to information with separation of the most actual directions of the studies.

Введение. С переходом человеческой цивилизации в постиндустриальную информационную фазу, в которой информация и информационная инфраструктура общества занимают одно из центральных мест, вопросы оценки ценности информации становятся все более актуальными. Это обуславливает необходимость распределения информации по ее важности и ценности, с оценкой рисков ее искажения и потери. С практической точки зрения возникает необходимость в надежной методике определения ценности информации, которая в настоящее время отсутствует.

Постановка проблемы. Проблема оценки ценности информации имеет много аспектов: теоретический, методологический, системный и практический. Составляющими этих аспектов являются создание и формирование понятийного аппарата, согласованный набор методов исследования, методики оценок и критериев, а также разработка универсальных и надежных методик определения ценности информации. В структурированном виде проблема формулируется [1] в виде множества целей, множества свойств проблемы и множества операторов по достижению цели.

Анализ литературы. Проблеме ценности информации посвящено достаточно большое число работ, перечень которых приводится, например, в работах [2,3]. Этой научной задачей занимались такие известные ученые, как Колмогоров А.Н., Харкевич А.А., Стратонович Р.Л., Бонгард М.М., Бутрименко А.В., Мороз Б.И. и др. В этих работах было сформировано понятие ценности информации для целенаправленных систем. При этом системы рассматривались с различных точек зрения с выделением основной функции системы. Также было введено понятие ценности информации с введением численных критериев. Разработаны методы измерения и вычисления численных мер ценности информации. Осуществлена постановка и решение задач по определению зависимости меры ценности информации от времени – учет процессов старения информации.

Исторически первыми подходами (работы Харкевича А.А., Стратоновича Р.Л., Бонгарда М.М.) были попытки определить ценность информации через приращение вероятности достижения цели системой. Однако, в общем случае, ценность информации необходимо определять и в многоцелевых системах. При этом цели, с течением времени, видоизменяются, особенно с нечетко определенными целями. Поэтому представляется целесообразным провести исследование проблемы ценности информации с достаточно общих позиций, а именно, с постановки задачи создания теории ценности информации.

Цель статьи – разработка, на основе системного анализа наиболее распространенных подходов к ценности информации, требований к созданию теории оценки ценности информации с выделением наиболее актуальных направлений исследований.

1. Теоретический аспект проблемы. Для достижения поставленной цели необходимо, в первую очередь, провести анализ основных результатов тех областей знаний, которые позволяют структурировать и выкристаллизовывать основные понятия теории, на основе которого провести формирование целей создания теории ценности информации и выработать подходы к ее классификации.

Центральным вопросом в формировании понятийного аппарата теории является понятие информации. Это одно из ключевых понятий кибернетики, которое имеет достаточно много определений. Так, по мнению Французской Академии Наук, знанием является символическое представление действительности. Следовательно, информация – это некоторое упорядоченное множество зафиксированных символов произвольной природы. Со времени начала развития теории информации, как математической теории связи [4], в естествознании сложилось несколько точек зрения.

В узком классическом смысле теория информации предназначена для решения задач повышения эффективности функционирования систем связи. Это задачи формализации описания источников информации, их оптимального кодирования, а также определение предельно допустимых пропускных способностей каналов связи.

В то же время теория информации, как синтезирующая дисциплина, призвана оптимизировать системы связи в целом путем решения многокритериальных задач с учетом математических моделей различных элементов. Такой подход является результатом естественного развития классической теории и ее приложений в области связи.

Одним из подходов к определению круга задач в рамках теории информации – это решение всех проблем и задач, в формулировку которых входит понятие информация. При таком подходе теория информации становится междисциплинарной и должна решать задачи в области семиотики, кибернетики, биологии, лингвистики, психологии, системологии, физики, метрологии и др. В классической шенноновской теории информации термин «информация» использован как синоним термина «количество информации», который имеет строгое математическое определение. Это понятие связано с другим центральным понятием этой теории – «энтропия». Энтропия является численной мерой статистической неопределенности, а информация – разность энтропии до получения информации и энтропии, оставшейся после снятия части неопределенности. Если неопределенность снята полностью, то энтропия численно равна информации. Однако данный подход имеет ограничения в случае нестатистического характера неопределенности, на что справедливо указывал Колмогоров

А.Н. [6]. Кроме того, к недостаткам численного значения энтропии, как меры неопределенности, относится и тот факт, что она может принимать бесконечно большие значения, хотя это и подтверждает пресловутый тезис «мир познаваем, но не до конца». Причем классическая (шенноновская) теория информации по Хэммингу представляется как математическая теория о представлении символов произвольной природы в некотором фиксированном алфавите.

С философской точки зрения информация – это свойство материальных объектов отражаться и быть отражаемыми.

По мере развития приложений на термин «информация» накладывалось все больше и больше нагрузки, пока это понятие не стало в один ряд с такими основополагающими понятиями, как материя и энергия. В широком смысле понятие информации всегда связано с ее фиксацией на некотором материальном носителе. Причем информация представляется в некоторой системе символов, изучаемых семиотикой на трех уровнях. Это синтаксический уровень, который исследует внутренние свойства текстов, семантический уровень, который формирует и изучает отношения между текстом и тем, что он обозначает в окружающем мире, а также прагматический уровень, изучающий отношения между текстом и теми, кто его использует. В силу полисемичности понятия «информация» его следует рассматривать с разных точек зрения.

Интуитивным представлением понятия «информация» являются некоторые сведения или сообщения. Причем, в классической теории информации подчеркивается, что под информацией понимают те сообщения, которые снимают неопределенность, измеряемую численно энтропией. В то же время принимается всеми, что информация представляется в некоторой знаковой системе (кодирование) и должна быть зафиксирована на некотором материальном носителе. Вне фиксации информации не существует. В связи с чем следует очертить круг общепризнанных свойств информации [7] с расшифровкой основных признаков и особенностей, характеризующих эти свойства.

Фиксируемость информации. Информация может существовать только на некотором материальном носителе.

Инвариантность информации по отношению к природе носителей. Одна и та же информация может быть записана на любом языке, любым алфавитом (системой знаков) на различных носителях.

Конечный объем информации. Информация представляется вполне определенным конечным числом элементарных символов (например, в бинарном коде) некоторого алфавита.

Бренность информации. Свойство информации уничтожаться и стареть как по причине разрушения носителя информации, так и в результате процессов использования информации (например, старение биржевых сводок).

Транслируемость, размножаемость и мультипликативность информации. Свойство информации быть перезаписанной на другой носитель или другой экземпляр носителя, а также возможность существования одной и той же

информации в виде нескольких копий.

Действительность информации как исходное свойство для построения некоторого оператора при целенаправленной деятельности.

Семантика. Информация должна иметь некоторый смысл, чтобы быть использованной для тех или иных целей.

Полипотентность информации – возможность ее использования для различных целей.

Ценность информации -свойство проявляться в материализованном виде при построении различных операторов.

Полнота информации о некотором объекте характеризует способность полного воссоздания на ее основе этого объекта.

С гносеологической точки зрения к теории информации существует два подхода. Первый подход основывается на том, что система символов (познательный аппарат) создается человеком в процессе его познавательной деятельности. При этом система взглядов на сущность информации включает наличие информации только там, где есть сознание, признает вторичность символа в познавательной деятельности человека, а также конечность объема информации об объекте.

Второй подход основывается на том, что символы изначально заданы надсистемой, а человек наполняет их смыслом в процессе жизнедеятельности. С этих позиций возникают альтернативные взгляды на сущность информации. Это вездесущность информации как в материальном мире, так и в мире духовного, признание первичности символа и того факта, что полная информация об объекте может быть бесконечна.

В то же время топологические формы конкретных физических объектов создают информационные структуры, которые называют формовыми статическими торсионными полями. Такое поле определяют как информационное поле, переносящее информацию о процессах, происходящих в физических объектах. Причем вокруг этих топологических форм существуют зоны, в которых возможен информационный контакт, основанный не просто на воздействии раздражителя на определенные органы чувств, а на непосредственном взаимодействии с информационными структурами человека, его мозгом [9]. Следует при этом заметить, что эти поля обладают высокой проникающей способностью [10]. Поэтому они проходят через природные среды без ослабления, то есть их нельзя экранировать природными материалами.

Такой подход, рассматривающий информационные поля как материальные, сглаживает различия между существующими двумя подходами, объединяет их и позволяет рассматривать понятие «информация» с единых материалистических позиций.

Исходя из большого количества проблем, существующих в теории информации, остановимся на формировании требований, предъявляемых к ценности информации при формировании этой теории.

2. Основные задачи и подходы к созданию теории ценности информации. Несмотря на сложность всей проблемы формулировки целей, представляется целесообразным структурировать задачи, которые предстоит решить теории ценности информации как в теоретическом, методологическом системном, так и в прикладном аспектах.

Теоретический аспект должен включать разработку методик понятийного аппарата интегрированных областей знаний, а также формирование верхних и нижних оценок необходимого количества информации для решения сложных проблем.

Методологический аспект включает разработку методик выбора смежных областей знаний с системным анализом их результатов; структуризацию методов исследования с точки зрения их общенаучной значимости и ценности; методологии выделения компонент «анализ – синтез» с возможностью декомпозиции проблем на подзадачи.

Системный аспект должен включать классификацию и формирование иерархии ценностных целей и средств исследований.

Прикладной аспект включает формирование приложений, использующих ценность информации, а также кристаллизацию постановок нерешенных проблем с использованием ценности информации.

Жизненный цикл информации неразрывно связан с ее ценностью. Так оценка ценности информации и ее новизны осуществляется при самом факте ее фиксации. Поэтому такая связь в создаваемой теории ценности информации должна быть основополагающей.

Таким образом, теория ценности информации представляется некой синтезирующей концепцией, которая должна обобщить основные результаты достаточно большого числа научных дисциплин как философского, фундаментального, так и прикладного характера. При этом представляется целесообразным подойти к созданию теории ценности информации с нескольких позиций. В первую очередь необходимо выделить те области знаний, которые позволяют конкретизировать понятие «информация» как нечто, имеющее ценность. Затем сформировать подходы к определению содержания понятия «ценность информации». И, наконец, сформулировать и решить проблему формально – численного выражения ценности, что является весьма важным элементом научного метода познания вообще.

Выводы. В результате системного анализа наиболее распространенных подходов к оценке ценности информации предложены решения, позволяющие составить основу создаваемой теории. При этом предложено использовать системный подход в качестве методологической основы формулировки и структуризации сложных задач. Следует также рассматривать информацию как объект, имеющий ценностные показатели, с возможностью ее дальнейшей струк-

туризации. Причем, количественные показатели ценности информации должны быть динамичными и иметь неразрывную связь с временными характеристиками.

Список литературы. 1. Дружинин В.В., Конторов Д.С. Проблемы системологии. – М.: Сов. радио, 1976. – 296 с. 2. Мороз Б., Яковенко В., Шукурова І. Методи визначення цінності інформації для організації її захисту // Правове, нормативне та метрологічне забезпечення системи захисту інформації в Україні. – 2001. – Вип. 2. – С. 46-53. 3. Мороз Б., Харapoнов М. Розробка теоретичних методів визначення цінності поточної інформації в системах керування з метою її захисту // Правове, нормативне та метрологічне забезпечення системи захисту інформації в Україні. – 2000. – С. 69-70. 4. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. – М.: ИЛ, 1963. – 830 с. 5. Дмитриев В.И. Прикладная теория информации. – М.: Высшая школа, 1989. – 320 с. 6. Колмогоров А.Н. Три подхода к определению понятия «количество информации» // Проблемы передачи информации. – 1965. – Том 1, вып. 1. – С. 3-11. 7. Корогодін В.І. Інформація як основа життя. – Центр «Фенікс», 2000. – 205 с. 8. Волькенштейн М.В. Энтропия и информация. – М.: Наука, 1986. – 192 с. 9. Акимов А.Е., Финогенов В.П. Экспериментальные проявления торсионных полей и торсионных технологий. – М.: НТИЦ «Информатика» 1966. – 68 с. 10. Шемчук Т.Я., Федосенко А.В., Петренко К.Д. Исследование влияния торсионных полей на полимерные материалы // Изв. высш. уч. заведений. Приборостроение. – СПб., Издание Института точной механики и оптики. – 1993. – Том 36, № 6. – С. 79.

Поступила в редакцию 09.10.2009

А.А.СЕРКОВ, докт.техн.наук, проф., ХНУВД, Харьков;

В.Я.ПЕВНЕВ, канд.техн.наук, зав. кафедрой, ХНУВД, Харьков;

Л.Ю.НЕСТЕРЕНКО, бакалавр, ХНУВД, Харьков

МЕТОДИКА ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОЙ КОНФИГУРАЦИИ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ

Розглянуто критерії ефективності систем захисту інформації. Наведено етапи побудови систем технічного захисту інформації. Описано основні способи підвищення надійності технічних систем. Сформульована математична постановка задачі обрання конфігурації системи. Запропонована методика побудови системи захисту інформації, яка задовольняє завданням вимогам щодо надійності із урахуванням завданих обмежень.

The criteria of efficiency of the systems of protection to information are considered. The stages of the building of the systems of technical protection to information are presented. They ways of increasing to reliability of the technical systems are shown. Mathematical statement of the problem configuring systems is worded. The methods of the building of the system of protection to information, satisfying given requirements on reliability with provision for brought forth restrictions are offered.

Постановка проблемы. Одной из самих востребованных задач, с точки зрения пользователя, является задача обеспечения заданного уровня безопасности системы (ЗУБС) при минимальных затратах. ЗУБС следует обеспечивать набором приборов, которые перекрывают весь спектр возможных угроз, как по утечке информации, так и по ее искажению.

Анализ литературы. В современной литературе достаточно много внимания уделяется надежности защиты информации (ЗИ). Однако при этом отсутствует оценка надежности защиты с точки зрения надежности аппаратуры и программных средств. Этот аспект затрагивается в работах [1,2], однако он рассматривается с точки зрения средств нападения.

Цель статьи – разработка методики выбора оптимальной конфигурации систем.

Критерии эффективности. Информация с ограниченным доступом (ИСОД) в процессе информационной деятельности может подвергаться воздействию угроз ее безопасности. В связи с этим возможна утечка или нарушение целостности информации. Склонность ИСОД изменяться под действием угроз определяет ее уязвимость. Способность систем ЗИ (СЗИ) противостоять действию угроз определяет эффективность защиты ИСОД. При разработке и оценке качества СЗИ необходимо использовать критерии эффективности. Существует несколько вариантов этих критериев [3]:

- достижение необходимого уровня защиты ИСОД при минимальных затратах и допустимом уровне ограничений видов информационной деятельности (ИД);

- достижение необходимого уровня защиты ИСОД при допустимых затратах и заданном уровне ограничений видов ИД;
- достижение максимального уровня защиты ИСОД при необходимых затратах и минимальном уровне ограничений видов ИД;
- достижение минимального времени восстановления при сбоях и отказах, которые вызваны нарушением информационных ресурсов.

Защита информации, которая не является государственной тайной, обеспечивается, как правило, использованием первого или второго критерия. ЗИ, которая составляет государственную тайну, обеспечивается, как правило, использованием третьего варианта.

С целью противостояния утечки или нарушения целостности ИСОД используют техническую защиту информации (ТЗИ). Цель ТЗИ может достигаться построением системы ЗИ, которая является организованной совокупностью методов и способов обеспечения ТЗИ. При построении системы защиты информации (СЗИ) необходимо ТЗИ выполнять поэтапно:

- 1 этап – определение и анализ угроз;
- 2 этап – разработка СЗИ;
- 3 этап – реализация плана ЗИ;
- 4 этап – контроль функционирования и управления СЗИ.

Математическая постановка задачи. При построении любой технической системы следует учитывать возможность выхода из строя любого из компонентов системы. В таком случае используют понятие надежности системы. При этом под надежностью понимается возможность системы сохранять во времени в установленных границах значения всех параметров, которые характеризуют способность выполнять нужные функции в заданных режимах и условиях использования, технического обслуживания, ремонта и т.д. [3,4]. Надежность системы можно обеспечить двумя способами. Первый способ – создание надежных приборов, использованных для построения системы, второй – резервирование приборов с низкой надежностью. В первом случае выход из строя, хотя бы одного прибора ведет к выходу из строя всей системы. Во втором случае выход из строя одного из дублированных приборов не воздействует на работоспособность всей системы.

Таким образом, критерием эффективности для разрабатываемой системы [5] будет минимизация выхода из строя системы защиты информации при заданной стоимости и обеспечении заданного уровня ЗИ. Математическая постановка задачи будет выглядеть таким образом:

$$\Xi = \min \left\{ 1 - \prod_{i=1}^N (1 - x_i^{x_j^i}) \right\}$$

при ограничениях

$$\sum_{i=1}^N d_i x_i^j \leq D; \quad \{x_1, \dots, x_N\} \geq X,$$

где: Ξ – вероятность отказа СЗИ; x_i – вероятность отказа i -го прибора; d_i – количество приборов i -го типа в системе; D – максимальное количество приборов в системе; X – минимальное количество типов приборов в системе, необходимое для решения поставленной задачи; x_i – типы приборов.

Методика выбора конфигурации системы.

Предлагаемая методика основывается на определении максимума надежности при ряде принятых ограничений.

Порядок действий выглядит следующим образом.

1. Обследовать объект, подлежащий защите, на предмет возможных каналов утечки информации и угроз.
2. Определить минимальный перечень оборудования, позволяющий решить поставленную задачу.
3. Определить надежность и стоимость выбранных приборов, обеспечивающих заданный уровень ЗИ.
4. Рассмотреть ограничения, выдвинутые заказчиком.
5. Составить перечень необходимого оборудования с учетом требований п. 4.
6. Составить перечень оборудования, учитывая требования п. 5, с возможным дублированием приборов.
7. Произвести расчет вероятностей отказа выбранных приборов с учетом результатов, полученных в п. 6
8. Построить ациклический граф возможной конфигурации системы.
9. Решить задачу определения кратчайших путей с учетом ограничений.

Для решения задачи можно использовать метод, с помощью которого задача решается кратчайшим путем, минимизировав целевую функцию. Она приобретет такой вид:

$$\min \left\{ \sum_{i=1}^N \left| \log \left(1 - x_i^{x_j^i} \right) \right| \right\}.$$

Выводы. Предложенные подходы к определению эффективности средств ЗИ следует использовать при создании системы ЗИ конкретного объекта. Причем эти критерии могут быть различными. Очевидно, что практически всегда в этих критериях будет присутствовать стоимость оборудования, обеспечивающего ЗИ, вероятность несанкционированного снятия информации, вероятность отказа систем ЗИ. В любом случае разработчикам системы придется сталкиваться с многокритериальной задачей, решение которой достаточно сложно.

В некоторых случаях при постановке задач могут возникнуть ограничения, например, на количество приборов, их вес, стоимость и т.д. Заданный

уровень безопасности следует обеспечивать набором приборов, которые перекрывают весь спектр возможных угроз как по каналам утечки информации, так и по ее искажению. Под искажением понимается нарушение целостности, т.е. как непосредственно искажение, так и полное или частичное уничтожение.

Следует отметить тот факт, что в своей совокупности комплекс приборов приобретает новые свойства, которые не свойственны каждому прибору в отдельности. Этот факт необходимо учитывать при выборе номенклатуры приборов, чтобы избежать дублирования и повышением стоимости системы.

Список литературы: 1. Кравченко В.И. Электромагнитное оружие / Кравченко В.И. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2008. – 185 с. 2. Кравченко В.И. Оружие на нетрадиционных принципах: Электромагнитное оружие / Кравченко В.И. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2009. – 266 с. 3. ДСТУ 28-60-94. Надійність техніки. – К.: Держстандарт України, 1994. – 36 с. 4. Новый энциклопедический словарь. – М.: Большая Российская энциклопедия, РИПОЛ Классик, 2004. – 1456 с. 5. Певнев В.Я. Эффективность информационной безопасности замкнутых систем / Певнев В.Я. // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – Вип. 5(39). – Харьков «ХАИ», 2009. – С. 82-85. 6. Серков А.А., Певнев В.Я. Информационная безопасность: концепция и средства обеспечения // Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць. Тем.вип: Техніка і електрофізика високих напруг. – Харьков: НТУ «ХПІ». – 2008. – № 44. – С. 132-136. 7. В.С. Харченко, Г.М. Тимонькін, В.О. Сичов, І.В. Лисенко Теорія надійності та живучості елементів і систем літальних комплексів. – Харків 1997. – С. 13-14. 8. ДСТУ 28-61-94. Державний стандарт України.

Поступила в редакцию 09.10.2009

УДК 622.24 : 537. 528

О.Н.СИЗОНЕНКО, докт.техн.наук, Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев;
Г.А.БАГЛЮК, докт.техн.наук, Институт проблем материаловедения им. И.М.Францевича НАН Украины, Киев;
А.И.РАЙЧЕНКО, докт.техн.наук, Институт проблем материаловедения им. И.М.Францевича НАН Украины, Киев;
А.И.ИВЛИЕВ, канд.техн.наук, Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев;
Е.В.ЛИПЯН, Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев

ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА НА ИЗМЕНЕНИЕ КОМПОЗИЦИИ ПОВЕРХНОСТИ ДИСПЕРСНЫХ ПОРОШКОВ 60Fe50TiC И СВОЙСТВ СПЕЧЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Наведено результати експериментальних комплексних досліджень впливу обробки суспензії порошку 60Fe50TiC високовольтним електричним розрядом на властивості спечених матеріалів.

Введение

Исследования свойств и применения высокодисперсных порошков, которые проводятся во многих развитых странах и в Украине, обусловлены, прежде всего, тем, что высокодисперсные порошки находят все более широкое применение при производстве композиционных алмазосодержащих материалов, сверхпроводников, солнечных батарей, фильтров, присадок к смазочным маслам, красочных пигментов, компонентов высокопрочных припоев и др. Основные достижения и, особенно, перспективы использования высокодисперсных порошков связаны с их особыми свойствами, которые определяются технологией получения.

Один из путей создания материалов с высокими физико-механическими и эксплуатационными характеристиками есть подход, который принято называть «сверху – вниз» (top – down), что предусматривает уменьшение размеров элементов структуры, то есть миниатюризацию размеров частиц порошков, и позволяет получать материалы высокой плотности с однородной гетерофазной структурой.

Известно [1, 2], что с помощью метода механической активации удается изменить структуру твердых тел, ускорить процессы диффузии, зародить активные центры на свежесформированной поверхности и т.д. Впервые к использованию этих эффектов подошли исследователи, которые изучали влияние высоких давлений с деформациями сдвига [3 - 5] и ударных волн на свойства твердых тел [6, 7]. Однако указанные эффекты можно получить и с использованием дробильного оборудования, что с практической точки зрения более целесообразно, особенно для непрерывных процессов. В результате совершенствования оборудования появились аппараты с высокой интенсивностью подведения энергии, и роль этих эффектов при измельчении сильно выросла. С помощью метода механической активации могут быть решены самые разнообразные задачи: повышение реакционной способности твердых тел, изменение структуры, ускорение твердофазных реакций и т.д.

Известно большое количество попыток в России и США использовать механохимический метод для интенсификации реакций в смесях неорганических и органических веществ [8, 9].

Анализ работ свидетельствует, что на эффективность диспергирования и активации можно влиять, изменяя условия, в которых они проводятся, в частности, варьируя температуру, давление, среду или вводя поверхностно-активные вещества (ПАВ) [10 - 15].

Согласно П.А. Ребиндеру [7] изменение свойств материала под воздействием ПАВ обусловлено снижением свободной поверхностной энергии и, как следствие, уменьшением работы, необходимой для увеличения поверхности.

Известно, что наиболее эффективными и безопасными методами воздей-

ствия на различные дисперсные системы являются физические методы, которые способствуют изменению их свойств. Одним из таких методов воздействия на физико-химические свойства гетерогенных систем является высоковольтный электрический разряд (ЭР). Высокая концентрация энергии в канале приводит к возникновению волн давления, близких к ударным, которые трансформируются в акустические с широким спектром частот, мощных гидротоков, кавитации, электромагнитных и термических полей.

Эти явления способствуют применению ЭР технологий во многих отраслях промышленности, поскольку позволяют влиять как на изменение геометрических размеров объекта, так и на структуру материалов с целью придания им определенных механических и физических свойств [16 - 19].

Волны давления, генерируемые в жидкости высоковольтным электрическим разрядом, в момент воздействия на поверхность материала вызывают распространяющиеся вглубь сдвиги и напряжения. После этого материал может разрушаться под влиянием волны растяжения значительно меньшей амплитуды. Растягивающие напряжения вызывают микротрещины. На образованной поверхности адсорбируются молекулы жидкости, которые не позволяют смыкаться краям трещины, выполняя расклинивающее действие. Поэтому при ЭР разрушении необходима незначительная энергия, которая будет способствовать усталостному разрушению материала.

Цель настоящей работы – исследование влияния высоковольтного электрического разряда на изменение композиции поверхности дисперсных порошков 60Fe50TiC с целью улучшения структуры и основных свойств консолидированных материалов.

Объекты и методы исследования

Исследования выполнены на специально разработанном стенде, структурная схема которого представлена на рис. 1.

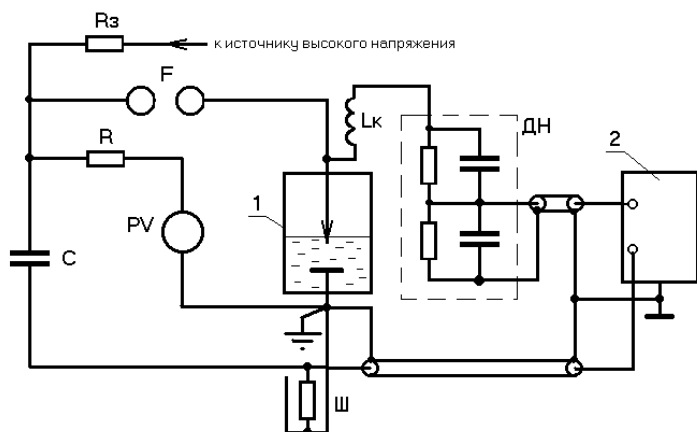


Рисунок 1 – Структурная схема экспериментального стенда: C – конденсатор накопителя; R_z – балластный резистор; R – резистор; PV – киловольтметр; F – воздушный разрядник; Π – коаксиальный шунт; L_k – катушка компенсации; ДН – делитель напряжения; 1 – разрядная камера; 2 – осциллограф

Технологическая часть – разрядная камера, которая представляет собой толстостенный цилиндр с верхней и нижней крышкой. В нижней крышке выполнено коническое углубление для наполнения обрабатываемым материалом. В верхнюю крышку, с дренажным отверстием для сброса газа, вмонтирована электродная система, сменное острие которой образует разрядный промежуток с днищем.

Обработке подвергалась суспензия композиционных порошков $60Fe50TiC$ в воде и в органической жидкости. В качестве органической жидкости был выбран керосин. Объем суспензии был 1 литр, соотношение твердой и жидкой фазы составляла 1:3, количество удельной энергии на единицу его объема варьировалось от 200 до 400 кДж/л. После обработки жидкость выпаривалась, а порошок высушивался. Для оценки воздействия на композицию поверхности (дисперсности и фактора формы $F = 4\pi S/P^2$, где S – площадь проекции частицы, P – периметр проекции частицы) выполнялся компьютерный гранулометрический анализ порошков до и после воздействия.

Результаты экспериментальных исследований

Микрофотографии исходного и обработанного порошков $60Fe50TiC$ представлены на рис. 2 – 4. Как видно на рис. 2, частицы исходного порошка имеют относительно малоразвитую поверхность, средние значения размеров частиц исходного порошка составляют 145 мкм, фактор формы по Салтыкову $F \approx 0,58$.

ЭР в суспензии композиционных порошков $60Fe50TiC$ в воде и в керосине приводит к изменению композиции их поверхности. После обработки в воде преобладают округлые

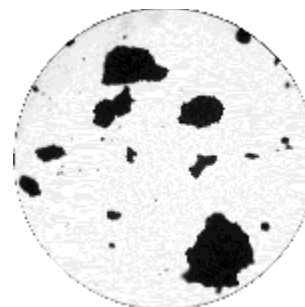


Рисунок 2 – Исходный порошок $60Fe50TiC$ ($\times 75$)

50 мкм (при $\Sigma W_{уд.} = 200$ кДж/л), при этом поверхность частиц довольно развита и фактор формы $F \approx 0,52$ (рис. 4).

Таким образом, очевидно, что при электроразрядном воздействии происходит изменение композиции поверхности (фактора формы и дисперсности) порошков $60Fe50TiC$. Кривые распределения частиц по размерам (см рис. 5) показывают изменение содержания фракций в композиции порошка. После ЭР обработки возрастает содержание мелких фракций, причем для суспензии порошка в керосине его размеры сильнее смещаются в область мелких фракций.

Ключевой стадией в получении материала из смеси дисперсных порошков является процесс консолидации. Из исследуемого порошка $60Fe50TiC$ традиционным способом – статическим прессованием при $P = 650$ МПа и вакуумным прессованием и вакуумным спеканием при $T = 1050$ °С были изготовлены образцы – из исходного порошка $60Fe50TiC$, а также из порошков, обработанных в воде и в органической жидкости. Микроструктура этих образцов представлена на рис. 6-8.

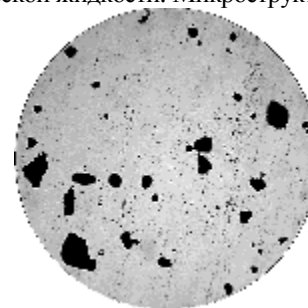


Рисунок 3 – Порошок $60Fe50TiC$, обработанный ЭР в воде ($\times 75$)

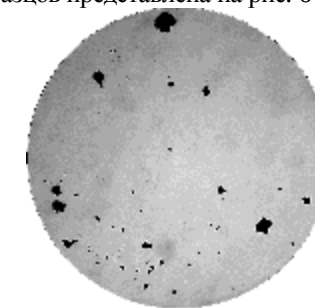


Рисунок 4 – Порошок $60Fe50TiC$, обработанный ЭР в керосине ($\times 75$)

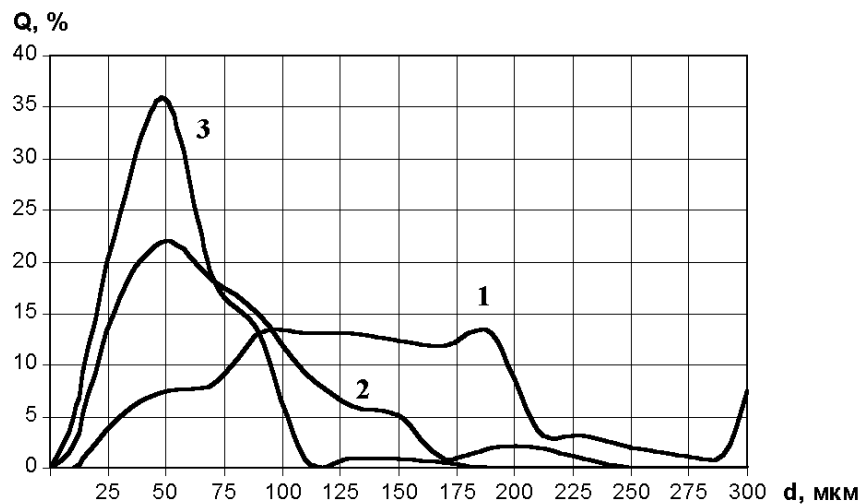


Рисунок 5 – Кривая распределения частиц порошка 60Fe50TiC по размерам:
1 – исходный порошок; 2 – порошок, обработанный ЭР в воде;
3 – порошок, обработанный ЭР в керосине

Исследования твердости материала проводились по методике Виккерса и Роквелла.

Твердость по Виккерсу при нагрузке на индентор 10 кг (HV10) у спеченных образцов из исходного порошка составила 5,8 ГПа, а после ЭР обработки порошков в органической жидкости твердость образца возросла до 8,8 ГПа, твердость образцов после обработки в воде не отличалась от исходных.

Таким образом, ЭР обработка композиционных порошков 60Fe50TiC в органической жидкости и дальнейшая консолидация путем статического прессования и вакуумного спекания приводит к формированию материала путем спекания с высоким уровнем твердости по Роквеллу (63-64 HRC), а уровень твердости образцов после обработки в воде не отличался от исходной (50-52 HRC).

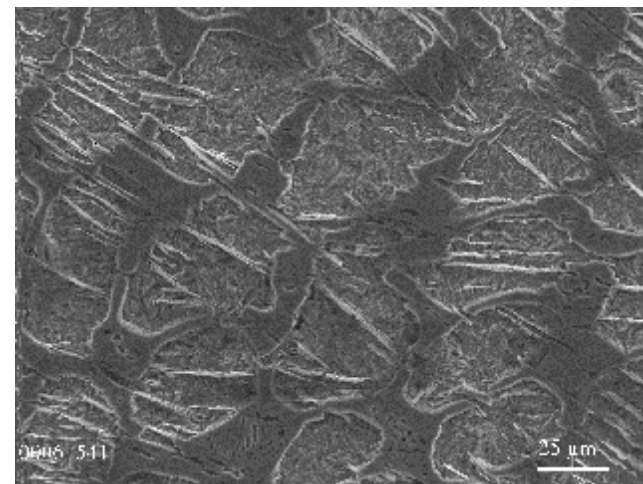


Рисунок 6 – Микроструктура материала 60Fe50TiC после прессования и спекания из исходного порошка

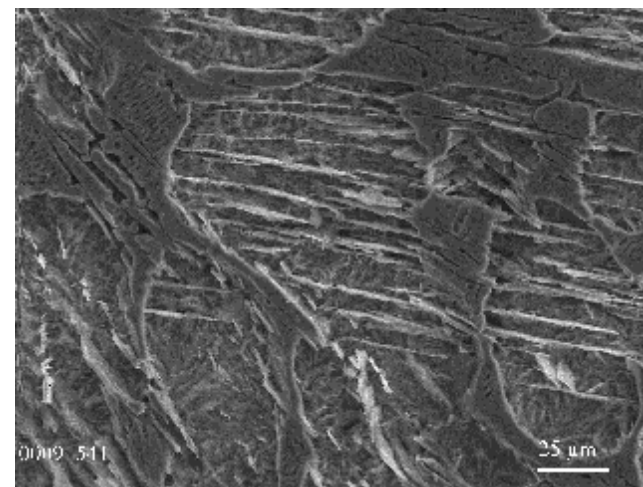


Рисунок 7 – Микроструктура материала 60Fe50TiC, полученная после прессования и спекания порошка после ЭР обработки в воде

Как известно, высокий уровень физико-механических свойств определяется дисперсностью зеренной структуры, что непосредственно вытекает из экспериментально установленной зависимости твердости и предела текучести от размера зерна (соотношение Холла-Петча) [20]. Наши исследования показали, что уменьшение ~ в 2 раза средних значений размеров частиц порошка при ЭР в воде хоть и приводит к изменениям в структуре консолидированного мате-

риала (см. рис. 3), на твердость особого влияния не оказывает.

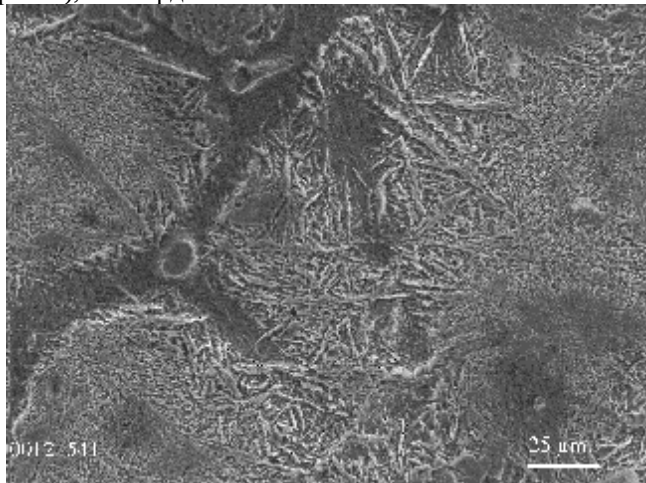


Рисунок 8 – Микроструктура материала 60Fe50TiC, полученная после прессования и спекания порошка после ЭР обработки в керосине

Использование углеводородной жидкости в качестве рабочей среды при электроразрядном воздействии на композиционные порошки 60Fe50TiC способствует более существенному изменению композиции поверхности и их активации, в результате чего получается игольчатая структура с повышенным (в ~ 1,5 раза) уровнем твердости.

Активация порошков при высоковольтном электрическом разряде в углеводородной жидкости, по нашему мнению, может происходить как в результате изменения композиции поверхности – измельчения крупнодисперсных частиц в 3 раза и более, значительного развития поверхности частиц порошка и изменения их формы, так и очищения поверхности частиц от примесей и адсорбционных пленок, изменения состава функционального покрова поверхности, изменения химического состава, стехиометрического состава и микроструктуры поверхности порошка. Обосновано это тем, что при высоковольтном ЭР в углеводородной жидкости происходит интенсивное газообразование, которое вызвано ее разложением с образованием атомарных возбужденных и ионизированных частиц. Рекомбинационные процессы типа $H + H \rightarrow H_2$; $C + O \rightarrow CO$ и т.д. могут иметь место в парогазовой полости и определяют образование газообразных продуктов. При этом атомарный углерод может как проникать в структуру порошка, так и распределяться на его поверхности, что в значительной мере влияет на физико-механические свойства материала.

В результате изменения композиции поверхности и активации порошков при их консолидации создаются условия для повышения скорости диффузион-

ных процессов и формирования игольчатой структуры материала, отличающегося высокими физико-механическими свойствами.

Выводы

Результаты исследований показали, что использование углеводородной жидкости в качестве рабочей среды при электроразрядном воздействии на порошки 60Fe50TiC способствует изменению композиции поверхности и их активации, в результате чего при их консолидации в результате статического прессования и вакуумного спекания создаются условия для повышения скорости диффузионных процессов и формирования игольчатой структуры материала, отличающегося высокими физико-механическими свойствами.

Список литературы: 1. Щукин Е.Д., Перцов А.В., Амелина Е.А. Коллоидная химия. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1982. – 352 с. 2. Лихтман В.И., Щукин Е.Д. Физико-химические явления при деформации металлов // Успехи физ. наук. – 1958. – Т. 63, вып. 2. – С. 213-245. 3. Соловьева А.Б., Жорин В.Л., Ениколопан Н.С. Химические превращения малоионовой и фумаровой кислот под воздействием высоких давлений, сочетаемых с деформацией сдвига // Докл. АН СССР. – 1978. – Т. 240, № 1. – С. 125-127. 4. Жорин В.А. и др. Совместная полимеризация стирола и метилметакрилата при высоких давлениях и сочетании с деформацией сдвига // Докл. АН СССР. – 1974. – Т. 219, № 3. – С. 647-652. 5. Жорин В.А. и др. Образование комплексов железа с графитом при высоких давлениях и сдвиговых деформациях // Докл. АН СССР. – 1981. – Т. 256, № 3. – С. 598-600. 6. Дремин А.Н., Бреусов О.Н. Процессы, протекающие в твердых телах под действием сильных ударных волн // Успехи химии. – 1988. – Т. 37, вып. 5. – С. 898-916. 7. Ребиндер П.А., Калиговская П.А. Понижение прочности поверхностного слоя твердых тел при адсорбции поверхностно-активных веществ // Журн. техн. физики. – 1932. – Т. 2. – С. 726-755. 8. Авакумов Е.Г. Механические методы активации химических процессов: 2-е изд., перераб. и доп. – Новосибирск: Наука, 1986. – 305 с. 9. Шавишкова С.Ю. Интенсификация химических процессов воздействием микроволнового излучения: автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук: спец. 07.00.10 "История науки и техники", 02.00.13 "Нефтехимия". – Уфа, 2003. – 20 с. 10. Болдырев В.В. Использование механохимии в создании "сухих" технологических процессов // Соросовский образовательный журнал. – 1997. – № 12. – С. 48-52. 11. Ковтун В.И. и др. Структурные и фазовые изменения в порошках оксидов меди, кобальта и титана, обработанных ударными волнами // Порошковая металлургия. – 2008. – № 9/10. – С. 149-157. 12. Linde R.K., DeCarli P.S. Polymorphic Behavior of Titania under Dynamic Loading // J. Chem. Phys. – 1969. – 50, № 1. – P. 319-325. 13. Silva Gomes J.F., Al-Hassani S.T.S. A note on times to fracture in solid Perspex spheres due to point explosive loading // Int. J. Mech. Sci. – 1976. – 18. – P. 193. 14. Silva Gomes J.F., Al-Hassani S.T.S. Internal fractures in spheres due to stress wave focusing // Int. J. Sol. Str. – 1977. – 13. – P. 1007. 15. Linde R.K., DeCarli P.S. Polymorphic behavior of titania under dynamic loading // J. Chem. Phys. – 1969. – 50, № 1. – P. 319-325. 16. Климов Л.Ф. и др. Использование энергии электрического разряда для дробления, бурения скальных пород и производства строительных материалов. – Ленинград: Изд-во Ленинградского высшего ордена Ленина Краснознаменного командного училища железнодорожных войск и военных сообщений им. М.В. Фрунзе, 1975. – 248 с. 17. Гаврилов Г.Н. и др. Разрядноимпульсная технология обработки минеральных сред. – Киев: Наукова думка, 1979. – 163 с. 18. Курец В.И., Усов А.Ф., Цукерман В.А. Электроимпульсная дезинтеграция материалов – Апатиты: Изд. Кольского научного центра РАН, 2002. – 324 с. 19. Pat. 3340052, US, Method of electrically sintering discrete bodies / Inoue K., 5.09.1967. 20. Андриевский Р.А., Глезер А.М. Размерные эффекты в нанокристаллических материалах. II. Механические и физические свойства // Физика металлов и металловедение. – 2000. – Т. 89, № 1. – С. 91-112.

Поступила в редакцию 02.10.2009

А.Ю.СКОБЛИКОВ, мл.науч.сотр., НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ»;
С.Ю.СКОБЛИКОВ, студент, НТУ «ХПИ»

РАЗРАБОТКА СПОСОБА ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ БЕСПРОВОДНОЙ СЕНСОРНОЙ СЕТИ

Наведено спосіб збільшення точності фізичної моделі бездротової сенсорної мережі, за рахунок заміни ПК на реальні мікроконтролерні системи. Розглянуто реалізацію запропонованого способу за допомогою стенду XBee Microlab. Описано основні можливості та технічні характеристики розробленого стенда.

The method of increasing wireless sensor network physical model accuracy by replacing PC with real microcontroller systems is offered. Implementation of the offered method with the help of XBee Microlab board is considered. The main features and characteristics of the developed board are described.

Постановка проблемы. Проектируемые беспроводные сенсорные сети (БСС) имеют многочисленные различия, как в области применения, так и в использованных технических решениях. В такой ситуации на передний план выходит проблема эффективного моделирования БСС. Традиционным подходом при моделировании процесса функционирования БСС является использование программных средств высокого уровня. Это позволяет эффективно представить БСС на всех уровнях модели OSI, кроме физического.

Существующие методы физического моделирования предполагают использование ПК в связке с отладочными комплектами для радиомодулей в качестве узлов БСС. В таком случае весьма затруднительным является определение энергопотребления узла, тогда как данная характеристика является одной из определяющих при разработке БСС.

Анализ литературы. Обзор существующих стандартов и технологий БСС, приведенный в [1], описывает модели беспроводного канала связи, и физический уровень стандарта IEEE 802.15.4. Однако при этом не учитывают мобильность узлов и динамику объектов окружения. Предполагают, что соединения считаются симметричными.

Типовые примеры, приведенные в работах [2-4], показывают возможность использования БСС для решения различных задач науки, техники и быта. Причем, методы моделирования БСС [5] зачастую используют средства программирования высокого уровня.

Цель статьи – разработка способа повышения точности физической модели БСС за счет замены ПК в ней на реальные микроконтроллерные системы (МС).

1. БСС стандарта Zigbee. Методы моделирования БСС. В последнее время беспроводные технологии связи активно развиваются в различных на-

правлениях. Одним из наиболее новых и перспективных направлений являются беспроводные сенсорные (датчиковые) сети. Обычно под беспроводной сенсорной сетью (БСС) понимается беспроводная многоячейковая (mesh) сеть (рис. 1) с низкой скоростью передачи данных и сверхнизким энергопотреблением. [1]

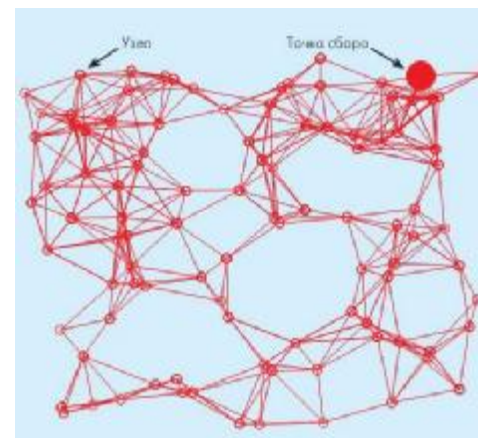


Рисунок 1 – Пример многоячейковой топологии беспроводной сенсорной сети

Развитие полупроводниковых технологий позволяет создавать малогабаритные устройства, совмещающие функции измерения определенных параметров окружающей среды, предварительной обработки результатов и пересылки данных для дальнейшей обработки. Такие устройства могут иметь низкую стоимость и работать длительное время (до 10 лет) от встроенного источника питания. Эти особенности позволяют использовать сенсорные сети для различных научных и прикладных целей. Исследовательские проекты показывают возможность применения сенсорных сетей для исследования движения ледников [2], обнаружения радиоактивных веществ [3], локализации снайперов в городских условиях [4].

В области БСС единственным установившимся стандартом сегодня является Zigbee [1]. Он основан на международном стандарте IEEE 802.15.4, который описывает физический и канальный уровни семиуровневой модели OSI, то есть все, что же касается непосредственно передачи данных по радиоканалу, а также доступа к нему [6]. Приняв стандарт IEEE 802.15.4 за основу, Zigbee описывает верхние уровни модели OSI для БСС, четко описывая процессы маршрутизации пакетов в сети, шифрования передаваемых данных и даже поддержку стандартных профилей (шаблонов) функционирования БСС в целом.

Архитектура стека протоколов ZigBee/802.15.4 [7] приведена на рис. 2. За прием и передачу данных по радиоканалу отвечает РНУ (физический) уровень, где определяются:

- рабочий частотный диапазон;

- тип модуляции;
- максимальная пропускная способность;
- число каналов.



Рисунок 2 – Архитектура стека Zigbee/IEEE 802.15.4

В соответствии со спецификацией стандарта ZigBee/802.15.4, поддерживается работа в двух частотных диапазонах: 868/915 и 2400 МГц. Физические параметры БСС (см. табл.) при работе в различных частотных диапазонах также варьируются

Физические параметры БСС стандарта Zigbee/IEEE 802.15.4

Рабочая частота, МГц	868/915	2400
Тип модуляции:	BPSK	O-QPSK
Число каналов	10	16
Пропускная способность на канал, кБит/с	40	250

В настоящий момент первый частотный диапазон является лицензируемым (в нем функционируют сети стандарта GSM), в то время, как второй является открытым. Поскольку механизма получения лицензии для операторов БСС на сегодняшний день не предусмотрен, то при проектировании БСС выбор зачастую падает на рабочую частоту 2,4 ГГц.

- На физический уровень в сетях Zigbee возлагаются следующие функции:
- Активация/деактивация приемопередатчика;
 - Детектирование энергии принимаемого сигнала;
 - Выбор рабочего канала в пределах рабочего частотного диапазона;
 - Индикация качества связи;
 - Прослушивание рабочего канала для реализации MAC-уровнем техно-

логии CSMA-CA.

Проектируемые сенсорные сети имеют многочисленные различия, как в области применения, так и в использованных технических решениях. В такой ситуации на передний план выходит проблема эффективного моделирования БСС. Традиционным подходом при моделировании процесса функционирования БСС является использование программных средств высокого уровня [1,5].

Основным различием между локальными беспроводными сетями (например, WiFi) и БСС является реализация именно нижних уровней (физического и канального), что и дает возможность обеспечить низкое энергопотребление узлами БСС. Существующие способы моделирования БСС с помощью средств высокого уровня позволяют эффективно представить БСС на всех уровнях модели OSI, кроме физического. Причиной тому является большая сложность и трудоемкость моделирования, а также наличие больших погрешностей в модели по сравнению с реальными физическими процессами.

Так, наиболее распространенной моделью беспроводного канала является модель логарифмически-нормального распределения потерь в тракте:

$$PL(d) = PL(d_0) + 10\alpha \lg\left(\frac{d}{d_0}\right) + N(0, s_{ch}^2) = \overline{PL}(d) + N(0, s_{ch}^2), \quad (1)$$

где d – расстояние между передатчиком и приемником (м), d_0 – эталонное расстояние (м), α – показатель степени потерь в тракте, $N(0, s_{ch}^2)$ – случайная Гауссова переменная в тракте с нулевым средним и дисперсией s_{ch}^2 .

Данная модель учитывает только влияние эффектов замирания ($N(0, s_{ch}^2)$), при этом остаются неучтенными мобильность узлов, динамика объектов окружения, а также несимметричность радиоканала. Моделирование перечисленных физических параметров является достаточно громоздким и трудоемким и ими зачастую пренебрегают, что ведет к ощутимому снижению точности математической модели в особенности для БСС.

В таком случае целесообразным является именно физическое моделирование узлов БСС с целью исследования реальных физических параметров узлов сети, беспроводных каналов, а также сети в целом.

Физическое моделирование позволяет исследовать следующие показатели сети:

- Электромагнитную совместимость (ЭМС) проектируемой БСС с существующими беспроводными сетями в данном диапазоне рабочих частот (например, WiFi);
- Помехоустойчивость БСС.

Кроме того, использование реальных радиомодулей на этапе физического моделирования позволяет также оценить возможное наличие ошибок функционирования узлов разрабатываемой БСС.

2. Способ повышения точности физической модели БСС. Исходя из

концепции создания БСС, в качестве ее узлов (рис. 3) используются интеллектуальные датчики, состоящие из устройств измерения параметров окружающей среды, микроконтроллеров и приемопередатчика для обеспечения беспроводной связи. Кроме того, в состав узлов БСС могут входить исполнительные устройства, которые могут быть использованы для обратной связи с окружающим миром. К примеру, возможно наличие исполнителей для изменения положения узла в пространстве с целью самоорганизации сети. Такая архитектура позволяет осуществлять сбор, первичную обработку информации, ее передачу по беспроводным каналам, а также организовать простейшую обратную связь по средствам исполнителей.



Рисунок 3 – Обобщенная структурная схема узла БСС

На сегодняшний день, при физическом моделировании БСС в качестве узлов используется ПК, реализующий функции устройств измерения параметров окружающей среды, исполнительных устройств, а также микроконтроллера (МК), управляющего работой узла в целом. Для моделирования приемопередатчика беспроводной связи используются отладочные комплекты различных фирм разработчиков, занимающихся созданием и реализацией радиомодулей Zigbee стандарта.

При существующем подходе весьма затруднительным является определение энергопотребления узла беспроводной сенсорной сети. Использование ПК для генерации потока данных, их обработки, а также управления узлом БСС требует постоянного преобразования формата данных при обмене с приемопередатчиком беспроводной связи. Это обусловлено отсутствием средств подключения радиомодуля к стандартным портам ввода/вывода ПК. Такое преобразование имеет ряд недостатков:

- задержки в передаче, вызванные работой аппаратных драйверов по

преобразованию форматов данных;

- повышенное энергопотребление, вызванное преобразованием форматов данных.

Говоря об энергопотреблении, что является крайне важным параметром для БСС, следует сказать, что при таком подходе нет возможности учета затрат МК реального узла на обмен данными, а также на управление модулем. При этом провести оценку энергозатрат ПК для решения этих конкретных задач не представляется возможным.

Еще одним немаловажным фактором является высокая стоимость предлагаемых отладочных комплектов, что приближает затраты на создание физической модели к стоимости проектируемой БСС.

Таким образом, на сегодняшний день при физическом моделировании БСС существует ряд серьезных ограничений значительно снижающих эффективность данного метода.

Для устранения этих недостатков предложено использовать реальные МС, которые позволяют более четко проследить взаимосвязи отдельных компонентов узла БСС, и оценить их характеристики значительно точнее.

Среди основных преимуществ предложенного способа по сравнению с существующим можно выделить следующие:

- прозрачность физической структуры узла БСС, которая позволяет четко выделить отдельные его компоненты;
- исключение промежуточного преобразования форматов данных при обмене между МК и беспроводным приемопередатчиком;
- снижение задержки, связанной с преобразованием форматов данных;
- возможность оценки совместимости существующих МС с радиомодулями, используемыми в качестве приемопередатчиков узлов БСС;
- точный расчет энергопотребления узла БСС и отдельных его блоков в различных режимах работы.

Разработанный способ физического моделирования БСС позволяет рассчитывать энергопотребление не только узла БСС в целом, но и отдельных его блоков. При этом расчет энергопотребления аналоговых цепей (например, аналоговые датчики, исполнительные устройства) осуществляют по формуле (2).

$$P_a = UI, \quad (2)$$

где P – значение энергии потребляемой аналоговой цепью [Вт], U – напряжение, подаваемое на цепь [В], I – ток, потребляемый цепью [А].

Для расчета энергопотребления микроконтроллеров используется формула (3).

$$P_{MC} = CU^2f, \quad (3)$$

где P_{MC} – значение потребляемой энергии микроконтроллера с CMOS архитектурой [Вт], U – напряжение питания [В], C – внутренняя емкость МК [Ф], f – тактовая частота МК [Гц].

Просуммировав значения потребляемой мощности для всех блоков и це-

пей узла БСС (4), получаем значение потребляемой мощности узлом в целом.

$$P_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n P_{ai} + \sum_{j=1}^m P_{MCj}, \quad (4)$$

где P_{Σ} – суммарная мощность, потребляемая узлом БСС [Вт], n – число аналоговых цепей, m – число МК, входящих в состав узла.

3. Микроконтроллерный стенд XBee Microlab. Реализация разработанного способа построения физической модели БСС выполнена на стенде XBee Microlab, внешний вид которого приведен на рис. 4.



Рисунок 4 – Внешний вид микроконтроллерного стенда XBee Microlab

При разработке данного стенда был выполнен анализ существующих программно-аппаратных решений на рынке радиомодулей стандарта Zigbee. Были рассмотрены устройства среднего класса основных фирм-производителей: Chipcon CC2520, Jennic JN5121-MO000/003, Freescale MC13192, Maxstream (Digi) XBee ZNet 2.5. Объектами рассмотрения стали модели с набором функций, регламентированных стандартом, а также дающих возможность организовать полноценные узлы (типов PAN router и PAN coordinator).

В процессе рассмотрения существующих решений были исключены те, которые позволяют организовать связь с МК только посредством интерфейса SPI. Использование интерфейса SPI заведомо ограничивает функциональность моделируемого узла БСС, в частности не позволяет использовать механизм прерываний при поступлении данных по беспроводной связи (ввиду того, что при использовании SPI приемопередатчик является ведомым и не может инициировать передачу данных в МК).

При дальнейшем детальном сравнении моделей Jennic JN5121-MO000/003 и Maxstream (Digi) XBee ZNet 2.5, выбор сделан в пользу последней ввиду ее более низкого потребляемого тока, а также более высокой чувствительности приемника [8].

Одним из требований при создании компонентов моделей является возможность их повторного использования. При создании компонентов физиче-

ских моделей, данное требование приобретает еще большую значимость. Возможность использования стенда XBee Microlab для создания широкого спектра физических моделей БСС была одной из основных идей при его создании. Выбранный радиомодуль сам по себе уже обладает большим набором функций и режимов, предусмотренных разработчиком с целью использования данного модуля для проектирования самых разнообразных по сложности и назначению узлов БСС. По этой причине основной задачей при разработке стенда была реализация простого и удобного доступа ко всем функциям радиомодуля, а также его простого сопряжения с большинством МК.

В результате, созданный авторами стенд обладает следующими основными характеристиками:

- Для обмена данными со стендом используется стандартный асинхронный последовательный интерфейс UART, поддерживаемый большинством МК.
- Для физического подключения стенда к МК используется стандартный 10-контактный разъем VH-10.
- Разработанный стенд может быть подключен к любым МК с 5В логикой.
- Стенд не требует внешнего источника питания. Вместо этого питание осуществляется от источников МК через интерфейсный кабель.
- Для управления режимом обмена данными между стендом и МК используется механизм RTS/CTS.
- Предусмотрены линии для управления и индикации режима работы приемопередатчика (рабочий режим/режим сна).
- Предусмотрена возможность аппаратного сброса работы приемопередатчика без сброса работы всей МК.
- На стенде предусмотрены контакты для подключения внешних цепей к любым выводам радиомодуля Maxstream (Digi) XBee ZNet 2.5, действующее значение напряжение в таких цепях не должно превышать 3В.
- Стенд позволяет устанавливать радиомодули XBee/XBee Pro с любым типом антенн.
- Стенд снабжен световой индикацией питания, а также режимов работы приемопередатчика.

Наличие перечисленных характеристик позволяет реализовать все преимущества предложенного способа физического моделирования БСС.

Кроме того, использование стенда XBee Microlab позволяет снизить затраты на создание физической модели по сравнению с решениями, предлагаемыми разработчиками радиомодулей.

4. Проверка работоспособности разработанного стенда. Для проверки работоспособности разработанного стенда XBee Microlab было проведено физическое моделирование БСС, представляющей собой простейшую систему пожаротушения. В ходе моделирования была проверена работа стенда для мо-

делирования всех трех типов узлов, предусмотренных стандартом Zigbee:

- PAN coordinator;
- PAN router;
- PAN end device.

В качестве микроконтроллерной системы для управления работой стенда был использован программно-отладочный стенд AVR Microlab версии СИЭС-1. Пример физической модели узла БСС приведен на рис. 5.

Выводы: Физическое моделирование является одним из важнейших этапов при проектировании БСС. Оно позволяет оценить важнейшие физические параметры разрабатываемой сети, такие как ЭМС, помехоустойчивость БСС, а также энергопотребление узлами сети.

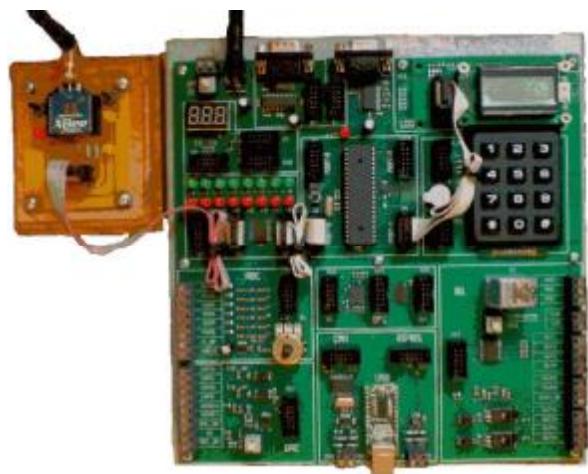


Рисунок 5 – Пример модели узла БСС на базе стендов Xbee Microlab и AVR Microlab СИЭС-1

В отличие от существующих способов, предложенный способ физического моделирования БСС позволяет оценить реальное энергопотребление узлов, а также точно измерить физические характеристики беспроводного канала и сети в целом за счет исключения дополнительной избыточности при обмене данными с ПК, с учетом реальной специфики функционирования МС. Предложенный метод реализован в стенде Xbee Microlab, который может быть применен для широкого спектра задач, решаемых в ходе физического моделирования. Эффективность предложенного способа и работоспособность стенда подтверждены серийей экспериментов по созданию разнообразных физических моделей БСС.

Список литературы: 1. Баскаков С. Стандарт ZigBee и платформа MeshLogic: эффективность маршрутизации в режиме многие к одному // Журнал «Первая миля». – № 2-3. – 2008. 2. К. Martinez,

J.K. Hart, R. Ong. Environmental Sensor Networks // Computer. – № 37(8). – 2004. – С. 50-56. 3. S. M. Brennan, A.M. Mielke, D.C. Torney, A.B. Maccabe. Radiation Detection with Distributed Sensor Networks // Computer. – № 37(8). – 2004. – С. 57-59. 4. M. Maroti, G. Simon, A. Ledeczi, J. Sztipánovits. Shooter Localization in Urban Terrain // Computer. – № 37(8). – 2004. – С. 60-61. 5. Дорошенко А.Е., Жереб К.А., Шевченко П.С. О моделировании сенсорных сетей средствами высокого уровня // доклад: УкрПРОГ, 23-25 мая 2006 г., г. Киев, Украина. 6. ANSI IEEE Std 802.15.4™-2006 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2003) IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems – local and metropolitan area networks – Specific requirements. Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANS). 7. Latest Zigbee specification including the pro feature set [Электронный ресурс] <http://www.zigbee.org/ZigBeeSpecificationDownloadRequest/tabid/311/Default.aspx>. 8. RF-модули Xbee™ Series 2 OEM. Техническое руководство.

Поступила в редакцию 09.10.2009

УДК 004.045:621.396.967.2

О.О.ТЮРИН, аспирант, НТУ «ХПИ»

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ СИСТЕМ СИГНАЛІВ СИСТЕМ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ОБ'ЄКТІВ НА БАЗІ ФАЗОВОЇ ТА ЧАСТОТНОЇ МАНІПУЛЯЦІЇ

Приводиться порівняльний аналіз систем сигналів, які реалізуються на базі псевдохаотичних послідовностей при використанні фазової та частотної маніпуляцій. Показано, що завдяки значно меншим бічним пелосткам функції невизначеності сигналів з фазовою маніпуляцією їх краще використовувати в системах ідентифікації повітряних об'єктів, для підвищення, як перешкодостійкості, так і енергетичної секретності.

A signals systems comparative analysis over, which will be realized on the base of pseudo- random sequences at the use of phase and frequency manipulations is brought. It is shown that due to the considerably less lateral petals signals vagueness function with phase manipulation it is better to use them in the systems of air objects authentication, for an increase, both noise-immunity and power secrecy.

Постановка проблеми. Розширення можливостей використання повітряного простору держави для польотів повітряних об'єктів неможливо без суттєвого підвищення ступеню технічної оснащеності сучасних засобами повітряного та наземного зв'язку, спостереження, навігації та автоматизації управління повітряним рухом, яка відповідає вимогам ІКАО. Все це указує на потребу підвищення надійності інформаційного забезпечення користувачів системи контролю використання повітряного простору. Вирішення поставлених задач неможливо без застосування інформаційних технологій в процес отримання, збору, обробки, зберігання та розповсюдження аеронавігаційних даних, які забезпечать аеронавігаційні системи та користувачів повітряного простору держави аеронавігаційною інформацією потрібної якості. Дійсно, використання інформаційних технологій дозволить підвищити рівень інформаційного забезпечення, що дозволить забезпечити безпечність польотів, підвищення економічності та регулярності польотів цивільної та воєнної авіації у районі аеродрому, на повітряних трасах та у позатрасовому повітряному просторі за рахунок автоматизації процесів текучого планування, отримання, збору, обробки та от обра-

ження інформації от різнорідних систем спостереження та метеоінформації.

Системи спостереження повинні забезпечити користувачів інформацією про координати та ідентифікацію повітряних об'єктів. Перша задача інформаційного забезпечення досить повно розглянута та реалізована на практиці, тим більш, що перехід до автоматичного залежного спостереження суттєвим чином підвищує вирішення інформаційного забезпечення користувачів. Друга задача вирішується за рахунок інформації систем ідентифікації і цій задачі інформаційного забезпечення користувачів системи контролю використання повітряного простору, на жаль, приділяється не зовсім потрібна увага.

Дійсно, принцип побудови, принцип обслуговування сигналів запиту та сигнали, які використовуються у існуючих системах ідентифікації (СІ) повітряних об'єктів (ПО) визначили відсутність як завадостійкості, та і енергетичний прихованості подібних систем [1,2]. Ця обставина значно зменшує надійність інформаційного забезпечення користувачів при наявності навмисних та ненавмисних внутрісистемних завад.

Аналіз літератури. У [3] показано, що методами спадкоємного переходу до завадозахищених СІ є реалізація беззапитних та адресних систем, у якості адреси яких використовуються площинні координати відповідача СІ. При цьому у СІ створюється система сигналів, кожний сигнал котрої визначається площинними координатами ПО. Завдяки спадкоємному переходу до адресних СІ вилучається можливість зацікавленої сторони несанкціоновано використовувати літакові відповідачі і, як наслідок, суттєвим чином збільшувати завадостійкість систем ідентифікації, що розглядаються. Ця обставина потребує розгляду систем сигналів (СС), які можуть бути використані у системах, які розглядаються. Таким чином, значне розширення класів задач, що вирішуються інформаційними системами, потрібність у застосуванні багатоадресних систем спостереження потребують використання СС. У багаточисельній технічній літературі показано, що з багатьох точок зору СС можуть бути отримані з використанням частотної та фазової маніпуляції [4 – 7].

З іншого боку, для приховування структури інформації, що закладається у сигнали СІ необхідно використовувати СС, структура яких не повторюється. Серед ФМ сигналів найбільше розповсюдження знайшли сигнали отримані шляхом маніпуляції фази за бінарною псевдовипадковою послідовністю [3-5]. У великій сукупності можливих послідовностей модуляції фази виділяють клас кодів, які забезпечують мінімальний рівень бокових залишків часо-частотної функції невизначеності (ФН). Цій вимозі задовольняють М-послідовності. У літературі показано, що такі сигнали можливість формування великої кількості ортогональних сигналів практично будь-якої тривалості та бази [4]. Серед інших сигналів, що можуть викликати зацікавленість, є сигнали, які отримують шляхом маніпуляції частоти за законом деякої числової (багаторівневої) псевдохаотичної послідовності при незмінних амплітуді та величині квантування за частотою та часом. Такі сигнали часто називають частотноманіпульованими

сигналами (ЧМС) [6].

Проведемо порівняльний аналіз систем сигналів утворених на основі вказаних вище сигналів.

Мета статті. Обґрунтування вибору систем сигналів для використання у завадозахищених системах ідентифікації.

Основна частина. Обґрунтування вибору СС проведено на прикладі сигналу, тривалість якого складає $\tau_i = 1, \dots, 2$ мс, а ширина спектра $\Pi = 8$ МГц.

ЧМС являє сукупність зімкнутих між собою радіоімпульсів, який з урахуванням псевдохаотичного закону модуляції описується виразом

$$u(t) = U_0 \sum_{i=1}^L [1(t - t_{i-1}) - 1(t - t_i)] \cos \left[2\pi f_0 t + \varphi_0 + \sum_{k=1}^{i-1} N_k \Delta f_0 \tau_0 + N_i \Delta f_0 (t - t_{i-1}) \right], \quad (1)$$

де U_0 , f_0 , φ_0 – амплітуда, несуча частота, початкова фаза сигналу; τ_0 – тривалість парціального імпульсу (крок квантування у часі); Δf_0 – крок квантування за частотою; $N_k \Delta f$ – рівні квантування за частотою; $1(t - t_{i-1})$ – одинична функція; $t_i = i\tau_0$ – моменти переключення частоти.

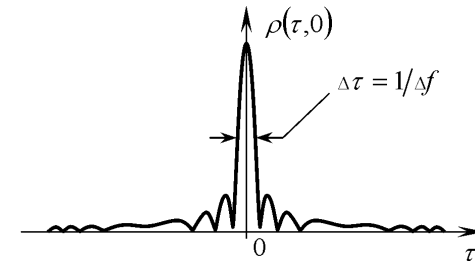


Рисунок 1 – Перетин ФН ЧМС

Спектр сигналу практично не відрізняється від спектра лінійно-частотно-модульованого сигналу і визначається співвідношенням $\Pi \approx L \Delta f_0$.

З виразу (1) визначається комплексна амплітуда сигналу, часовий запис якої має вигляд

$$\mathcal{U}(t) = U_0 \sum_{i=1}^L [1(t - t_{i-1}) - 1(t - t_i)] \exp \left[j \Delta f_0 \left\{ \sum_{k=1}^{i-1} N_k \tau_0 + N_i (t - t_{i-1}) \right\} \right]. \quad (2)$$

Нормована часо-частотна функція невизначеності (ФН) визначається виразом

$$\rho(\tau, F) = \frac{1}{2E} \left| \int_{-\infty}^{\infty} \mathcal{U}(s) \mathcal{U}^*(s - \tau) e^{j2\pi F s} ds \right|, \quad (3)$$

де E – енергія сигналу. Кінцевий вираз (3) з урахуванням (2) наведено у [5].

Як вказано у [6] у ході аналізу основних перетинів ФН ($\rho(\tau, 0)$, $\rho(0, F)$) при малих значеннях часової невизначеності τ вигляд $\rho(\tau, 0)$ визначається функцією

$$\rho(\tau, 0) = \left| \frac{\sin[L\pi\Delta f_0\tau]}{L\pi\Delta f_0\tau} \right|, \quad (4)$$

яка швидко затухає зі збільшенням τ . Вертикальний перетин ФН ЧМС $\rho(\tau, 0)$ наведений на рис. 1. ФН має гострий пік, ширина якого у площині $F = 0$ на рівні 0,64 складає $\Delta\tau = 1/\Delta f$. Кількість парціальних імпульсів ЧМ сигналу (розрядність коду) визначається за умови $L = \Pi/\Delta f_0$.

При застосуванні L – розрядного коду на виході пристрою узгодженої обробки забезпечується часове стиснення вхідного сигналу у L^2 разів. Такі сигнали дозволяють обирати розрядність коду в залежності від вимог до часового розділення сигналів та об'єму інформації, яку необхідно передати сигналом. L -розрядне квантування сигналу за частотою дає можливість отримати велику кількість кодових послідовностей. Цім забезпечується висока інформативність та завадозахищеність інформаційних систем. У той же час на основі аналізу властивостей часо-частотних ФН [6] та виразу (4) до недоліків застосування ЧМ сигналів можна віднести: достатньо великий рівень бокових залишків, який для функції (4) складає приблизно 20 % і не залежать від вигляду та тривалості кодової послідовності; при узгодженій обробці сигналу необхідно передбачити окремі частотні канали для кожного з парціальних імпульсів, кількість яких складає L , а також швидкодіючий електронний комутатор для підключення цих каналів у відповідності до використаного коду модуляції. Збільшення розрядності коду модуляції приводить до збільшення кількості частотних каналів. Сказане вище суттєво позначається на можливості технічної реалізації пристроїв формування та обробки сигналів маніпульованих за частотою псевдохаотичною дискретною послідовністю.

При використанні ФМ сигналів для зазначених вище тривалості та ширини спектра сигналів їх база складає $n = 8000 \dots 16000$. Період бінарної ($p = 2$) кодової послідовності l визначається кількістю комбінацій цифр на m позиціях і складає

$$l = p^m - 1 = 2^m - 1. \quad (5)$$

Для $m = 13$ максимальний період кодової послідовності складає $l = 8191$. Саме сигнал, модульований такою послідовністю і проаналізуємо у подальшому.

Серед усієї сукупності можливих варіантів кодових послідовностей ФМ сигналів виділяють клас М-послідовностей, для яких забезпечується мінімальний рівень бокових залишків [3]. Оскільки значення обраного періоду l є простим числом, то кількість варіантів М-послідовностей

$$x = (l - 1) / m = (8191 - 1) / 13 = 630. \quad (6)$$

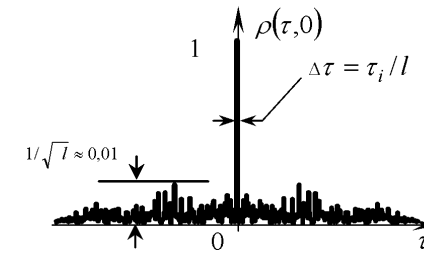


Рисунок 2 – Перетин ФН ФМ сигналу

Нормована функція невизначеності ФМ радіоімпульсу має вигляд [3]

$$r(t, F) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{m=0}^{n-1} \sum_{n=0}^{n-1} q_m q_n U_0(s - mt_0) U_0(s - nt_0 - t) e^{j2pFs} ds \right| / 2E, \quad (7)$$

де q_μ – визначає початкову фазу μ -го парціального радіоімпульсу, тобто приймає значення 1 або -1 . Для одного з варіантів М-послідовності на рис. 2. наведений перетин ФР площиною $F = 0$. З рис. 2. видно, що ФН має гострий пік, тривалість якого визначається тривалістю парціального імпульсу $\Delta t = t_i / l = t_0$. При цьому рівень бокових залишків для кодової послідовності складає $l = 8191$ складає $1/\sqrt{l} \approx 0,01$. Узгоджена фільтрація фазоманіпульованого сигналу з відомою частотою передбачає наявність лише одного частотного каналу.

Висновки. Таким чином, порівняльний аналіз систем сигналів на базі фазової та частотної маніпуляції показав, що при створенні систем сигналів для завадозахищених систем ідентифікації перевагу потрібно віддати сигналам з дискретною псевдохаотичною фазовою маніпуляцією.

Список літератури. 1. Комплексне інформаційне забезпечення систем управління польотами авіації та протиповітряної оборони // В.В.Ткачев, Ю.Г.Даник, С.А. Жуков, І.І.Обод, І.О. Романенко. – К.: МОУ, 2004. – 342 с. 2. І.І.Обод, А.А.Тюрин, А.В.Яровая. Сравнительный анализ существующих систем идентификации воздушных объектов // Системы управления, навигации та зв'язку: Збірник наукових праць. – Вип. 2(6). – К.: ЦНДІ НІУ, 2008. – С. 21-25. 3. Обод І.І., Тюрин О.О. Спосіб ідентифікації об'єктів. Патент на корисну модель № 32641 від 26.05.2008. 4. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. – М.: Радио и связь, 1985. 5. Тузов Г.И. Статистическая теория приема сложных сигналов. – М.: Сов. радио, 1977. – 345 с. 6. Глазов Б.И. Спектры и корреляционные функции частотоманипулированных шумоподобных сигналов // Радиотехника, 1970. – № 9. – С. 55-59. 7. Глазов Б.И., Котенко Л.П., Мерзликин Б.С. Анализ спектральных и корреляционных свойств L-ичных дискретных ЧМ сигналов // Радиотехника, 1979. – № 3. – С. 43-51.

Надійшла до редколегії 01.10.2009

О.В.ХВОЩАН, ИИПТ НАН Украины, Николаев;
Ю.И.КУРАШКО, канд.техн.наук, ИИПТ НАН Украины, Николаев;
Ю.И.МЕЛЬХЕР, ИИПТ НАН Украины, Николаев;
В.В.ЛИТВИНОВ, ИИПТ НАН Украины, Николаев

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО ПОЛЯ РАЗРЯДНИКА ПОГРУЖНЫХ СКВАЖИННЫХ КОМПЛЕКСОВ

Проведено теоретичний розрахунок втрат в розряднику електрогідрравлічних свердловинних комплексів, теоретично і експериментально досліджено його температурне поле. Розроблено рекомендації щодо конструктивного виконання розрядників.

The theoretical calculation of losses in the spark-gap of electro-hydraulic oil-well complexes is conducted, its temperature theoretical and experimental fields are explored. Recommendations in relation to structural implementation of spark-gaps are developed.

Введение. Критические условия работы погружных комплексов для обработки нефтяных скважин (температура окружающей среды до 100 °С, гидростатическое давление до 50 МПа) наряду с ограниченными габаритными размерами, определяемыми диаметром скважин, вызывают ряд вопросов, связанных с надежностью и стабильностью работы высоковольтного оборудования. Увеличение производительности комплексов вызывает увеличение потерь при их работе, что ведет к перегреву элементной базы и ее возможному выходу из строя.

Комплекс имеет модульную структуру. Ранее [1] был проведен расчет оптимальных параметров высоковольтного трансформатора модуля зарядного блока комплекса с полезной мощностью 10³ Вт для обработки нефтяных скважин, определены температуры перегрева его наиболее уязвимых частей.

Целью настоящей работы является анализ тепловых потерь в высоковольтном разряднике комплекса и определение его температуры перегрева для решения вопросов, касающихся надежности и стабильности работы комплекса.

Постановка задачи и методика расчета. Разрядник электрогидравлического погружного комплекса установки предназначен для передачи запасенной в конденсаторах комплекса энергии в нагрузку при достижении уровня зарядного напряжения 3·10⁴ В. В настоящее время разрядник выполнен газонаполненным и неуправляемым. В качестве газовой среды использован азот газообразный ГОСТ 9293-74 при давлении 1,01·10⁵ Па.

На основании проведенных в [2] исследований была разработана следующая конструкция разрядника (рис. 1). Корпус разрядника 1 представляет стальную трубу, внутри которой на стальных фланцах установлены с обеих сторон фарфоровые изоляторы 2 и 3 с медными электродами 4 и 5. Электроды имеют возможность осевого перемещения. Герметизация внутренней полости разрядника осуществляется с помощью резиновых уплотнительных колец прокладок, заглушки 6 и 7 используются при транспортировке и хранении.

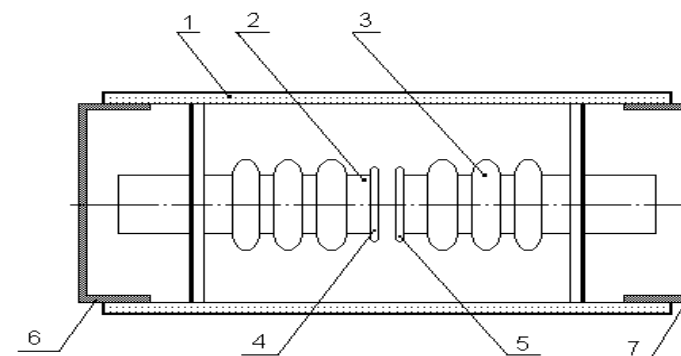


Рисунок 1 – Разрядник

Теоретический анализ тепловых режимов работы разрядника проводился с помощью программы для расчета различного рода физических полей *Femlab 3.1*, позволяющей, в частности, моделировать переходные характеристики и стационарную тепловую картину одно-, дву- и трехмерных конфигураций методом конечных элементов с достаточно высокой точностью. Анализ подвергалась осесимметричная двумерная модель (см. рис. 2). При составлении модели принимались следующие допущения:

- теплофизические характеристики материалов разрядника (см. таблицу) взяты при температуре 20 °С и принимались неизменными в процессе нагрева;
- граничное условие для образующей поверхности цилиндрической области, заключающей модель – условие постоянной температуры, поддерживаемой внешней средой;
- внутренняя цилиндрическая область заполнена азотом;
- рассмотрена модель при учете механизма теплопроводности, принято, что энергия, выделяющаяся в межэлектродном промежутке, идет на нагрев средней части электродов, джоулевы потери в тоководах разрядника не учитывались;
- потери в разряднике рассчитаны на основании гидродинамической теории импульсной дуги [3], методика расчета приведена ниже.

Материал	азот	сталь	воздух	медь	фарфор
Плотность ρ , кг/м ³	1,06	7840	1	8700	2450
Удельная теплоемкость C_m , Дж/(кг·К)	1060	465	1010	385	850
Теплопроводность λ , Вт/(м·К)	0,027	49,8	0,03	400	2

Согласно [3], мощность джоулевых потерь в канале дуги можно определить по формуле

$$P(i, t) = \frac{g \cdot i^{4/3}}{t^{2/3} \cdot t^{1/3}}, \quad (1)$$

где i – ток, протекающий через межэлектродный промежуток, кА; τ – период колебаний тока, мкс; t – время, мкс.

Коэффициент g определялся выражением

$$g = d \cdot \left(\frac{2 \cdot x \cdot r_0}{p \cdot s_0^2} \right)^{1/3}, \quad (2)$$

где d – длина межэлектродного промежутка, мм;

$$x = \frac{K_p \cdot g}{g - 1};$$

K_p – коэффициент поршня, $K_p \approx 0,75-0,9$; γ – эффективный показатель адиабаты Пуассона, для двухатомных газов $\gamma = 1,4$; ρ_0 – относительная плотность газа, для азота $\rho_0 = 1,06$; $\sigma_0 \approx 3 \cdot 10^3$ (Ом · м)⁻¹ при $d > 5$ мм.

Энергия, выделяющаяся в межэлектродном промежутке за время протекания разряда

$$W = \int_0^{1/f} P(i, t) dt, \quad (3)$$

где f – частота следования разрядных импульсов, Гц.

Энергия за полупериод периодического разряда согласно [3] аппроксимируется выражением

$$W_n \approx 0,45 \cdot g \cdot I_{mn}^{4/3}, \quad (4)$$

где I_{mn} – амплитуда разрядного тока в n -ый полупериод, кА.

Средняя зарядная мощность энергии, выделяющейся при работе разрядника, необходимая для теоретического расчета температурного режима, определялась выражением

$$P_{cp} = f \cdot \sum_n W_n. \quad (5)$$

Результаты теоретического расчета. Современные погружные комплексы для обработки нефтяных скважин имеют следующие параметры разрядного контура:

- напряжение зарядки емкостного накопителя – $U_0 = 30$ кВ;
- емкость накопителя – $C = 2,4$ мкФ;
- индуктивность разрядного контура $L \sim 3$ мкГн.

Известно, что оптимальным разрядом в электрогидравлических технологиях является затухающий синусоидальный, близкий к критическому. При этом амплитуды токов можно определить из [4]:

$$I_{mn} \approx U_0 \cdot \sqrt{\frac{C}{L}} \cdot e^{-\frac{p \cdot (2n-1) \cdot R}{4}} \cdot \sqrt{\frac{C}{L}}, \quad (6)$$

где R – активное сопротивление контура, Ом.

Активное сопротивление канала разряда в моменты максимума тока при режиме разряда накопителя, близком к критическому, $R \approx 0,8$ Ом. При этом $I_{m1} = 15,3$ кА; $I_{m2} = 5$ кА; $I_{m3} = 1,6$ кА; $I_{m4} = 0,5$ кА, декремент затухания (отношение амплитуд ближайших периодов тока) $\delta = 10$.

Суммарная энергия, выделившаяся в разряднике, рассчитана по формуле (4) и составила $\sum_n W_n = 1,63$ Дж.

Перегрев элементов разрядника в установившемся режиме при частоте разрядных импульсов 1 Гц, которой можно достичь в реальных условиях [5], представлен на рис. 2.

Как видно из рис. 2, при оптимальной работе погружного комплекса перегрев электродов разрядника относительно его корпуса ~ 40 °С. При уменьшении величины разрядного промежутка и, соответственно, его активного сопротивления уменьшится декремент затухания разрядного тока, увеличатся его амплитуды, что приведет к более высоким значениям перегрева элементов. Результаты расчета приведены на рис. 3.

Сравнение результатов теоретического расчета и эксперимента. Для определения достоверности результатов, полученных расчетом, был поставлен эксперимент, при котором разрядник Р замыкал контур (рис. 4) с параметрами:

- напряжение зарядки емкостного накопителя C – от 30 до 32 кВ;
- емкость накопителя – $C = 2,7$ мкФ;
- длина межэлектродного промежутка электродной системы ЭС – от 15 до 16 мм.

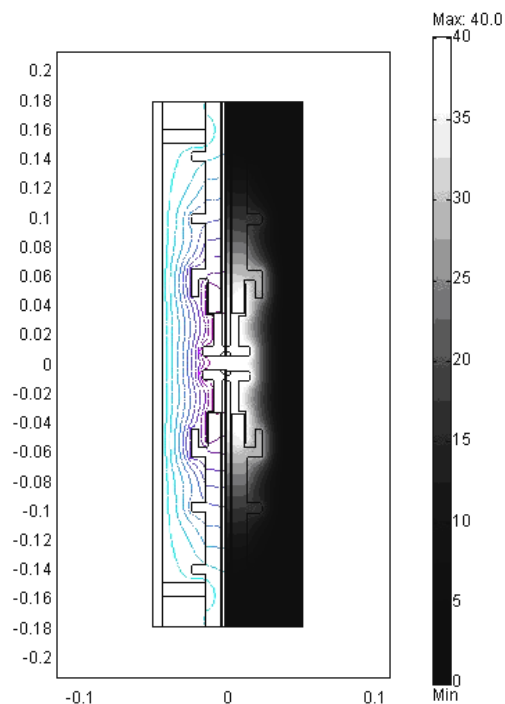


Рисунок 2 – Расчет температур перегрева элементов разрядника

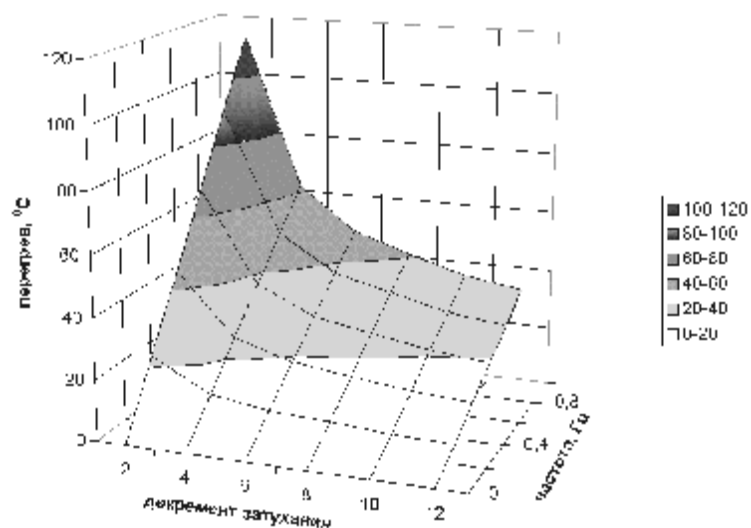


Рисунок 3 – Зависимость перегрева электродов разрядника относительно корпуса от декремента затухания и частоты разрядных импульсов

В процессе эксперимента фиксировались ток и напряжение на межэлектродном промежутке. Использовались осциллограф Tektronics TDS1012B, емкостно-резистивный делитель напряжения с коэффициентом уменьшения 1000, коаксиальный шунт с сопротивлением 0,0033 Ом. Характерные осциллограммы тока и напряжения на промежутке изображены на рис. 5. Масштабные коэффициенты:

- по напряжению – 9 кВ/дел.;
- по току – 17кА/дел.;
- по времени – 20 мкс/дел.

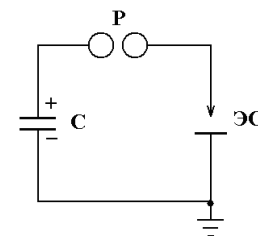


Рисунок 4 – Разрядный контур генератора тока скважинного комплекса

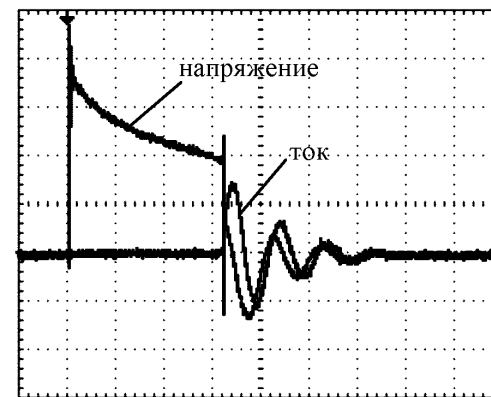


Рисунок 5 – Осциллограммы разрядного тока и напряжения на межэлектродном промежутке электродной системы

Следует отметить, что эксперимент проводился в условиях естественной воздушной конвекции корпуса разрядника, в то время как рабочий режим на скважине предполагает расположение погружной части комплекса с разрядником в скважинной жидкости. Поэтому в обоих случаях оценивался перепад температуры электродов разрядника относительно его корпуса.

Амплитуды токов согласно рис. 5 $I_{m1} = 22$ кА; $I_{m2} = 15$ кА; $I_{m3} = 10$ кА; $I_{m4} = 5$ кА, $I_{m5} = 1$ кА. Суммарная энергия по формуле (4) составила

$\sum_n W_n = 3,9$ Дж, при частоте следования разрядных импульсов $f = 0,8$ Гц мощность $P_{cp} = 3,1$ Вт. Теоретически рассчитанный перегрев электродов относительно стенки корпуса составил 76°C .

Экспериментальное измерение температуры электродов разрядника производилось двумя термомпарами К-типа.

Динамика нагрева элементов разрядника в процессе его работы с частотой повторения импульсов $0,8$ Гц приведена на рис. 6.

Измерения проводились до установления постоянной величины нагрева при температуре окружающей среды (воздуха) 17°C . Перегрев электрода вычислялся путем вычитания соответствующих значений температур электрода и корпуса разрядника. Как видно из рис. 6, перегрев электродов разрядника вышел на установившееся значение за 45 минут работы, при этом его измеренная величина (60°C) на 21 % меньше определенной теоретическим расчетом. Учитывая, что от 20 до 30 % разрядных импульсов не завершались пробоем рабочей среды, а происходило стекание заряда накопителя при малом разрядном токе, в разряднике выделялось меньшее количество энергии по сравнению с расчетом. Повысить точность результатов можно, производя осциллографирование тока и напряжения каждого импульса, протекающего через разрядник, что является достаточно трудоемким процессом. В то же время сравнение полученных данных с учетом описанных ранее погрешностей измерения свидетельствует о хорошей сходимости теоретических результатов с экспериментом.

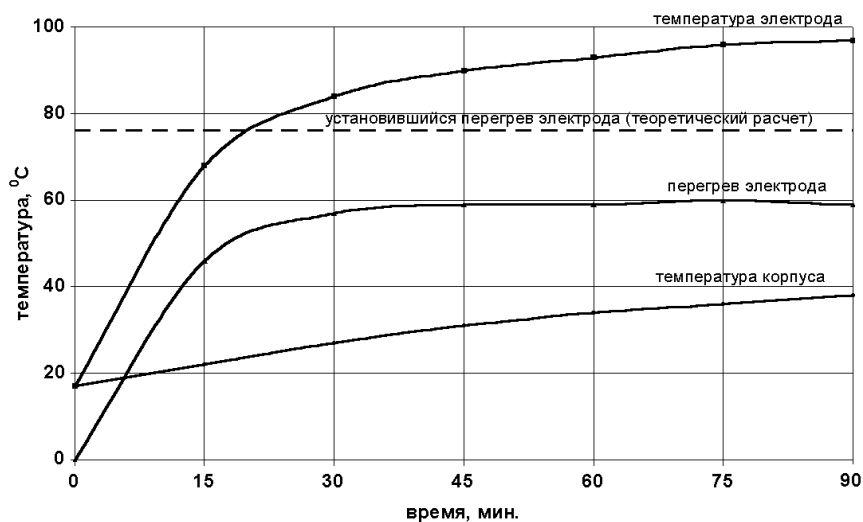


Рисунок 6 – Динамика изменения температуры элементов разрядника

По результатам исследований можно сделать вывод о возможности теоре-

тической оценки температур перегрева элементов разрядника при работе погружного комплекса. При затухающих синусоидальных, близких к критическим, разрядах возможно крепление электродов к тоководам при помощи припоев с высоким содержанием олова, имеющих начальную температуру плавления 183°C (например, ПОС 30, ПОС 40). Однако учитывая возможность работы комплексов при температуре окружающей среды $\sim 100^\circ\text{C}$ на короткие промежутки со слабо затухающей периодической формой разрядного тока, следует использовать более тугоплавкие сплавы (например, ПОСС 4-6 с температурой начала плавления 245°C) и тщательно подходить к вопросу выбора фарфоровых изоляторов разрядника.

Авторы выражают благодарность м.н.с. Тафтаю Э.И. за участие в проведении эксперимента и обсуждении результатов.

Список литературы: 1. О.В.Хвоцан, Ю.И.Курашко, В.В.Литвинов. Оптимизация габаритных размеров высоковольтного трансформатора погружных электроразрядных устройств повышенной мощности // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Тематичний випуск «Техніка і електрофізика високих напруг». – 2007. – № 34. – С. 112-118. 2. К.В.Дубовенко, Ю.И.Курашко, И.С.Швец. Анализ вероятностных характеристик пробоя компактного высоковольтного разрядника с газовой изоляцией // Труды 3-й Международной конференции «Электрическая изоляция – 2002». – С.-Петербург, 2002. – С. 370-372. 3. И.Н.Романенко. Импульсные дуги в газах. – Чебоксары: Чуваш. ун-т, 1976. – 136 с. 4. Л.А.Бессонов. Теоретические основы электротехники. – М.: Высшая школа, 1964. – 752 с. 5. О.В.Хвоцан, Ю.И.Курашко, В.В.Литвинов. Повышение эффективности зарядных процессов электроразрядных погружных комплексов увеличенной мощности // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Тематичний випуск «Техніка і електрофізика високих напруг». – 2006. – №37. – С. 86-92.

Поступила в редакцию 04.08.2009

СОДЕРЖАНИЕ

М.И.Баранов, В.В.Леденев, А.С.Свичкар Приближенный расчет переходной характеристики омического делителя напряжения на 1 МВ	3
М.И.Баранов, В.О.Лысенко Приближенные модели электродинамического разрушения древесины в атмосферном воздухе под действием прямого удара в нее линейной молнии	10
М.И.Баранов, М.А.Носенко Численное решение задачи воздействия импульсной составляющей тока линейной молнии на металлическую обшивку летательного аппарата	19
В.С.Бреславец, В.М.Поштаренко, О.М.Семенова Оцінка якості навчання студентів	26
И.В.Буравилов, Д.В.Винников, В.Б.Юферов, Б.В.Борц, А.Ф.Ванжа, А.Н.Пономарев, А.Н.Озеров, Е.В.Муфель, Г.В. Писарев Уменьшение размеров кристаллического зерна слитков в вакуумно-дуговых печах с импульсным воздействием	32
В.С.Гладков, А.А.Гученко, А.В.Шестериков, В.Я.Хайло, Маркус Штимер Высокопотенциальный трансформатор напряжением 100 кВ	40
В.С.Гладков, О.А.Гученко, О.В.Шестеріков Експериментальні дослідження макета установки очищення трансформаторного масла	42
Н.Д.Животов, Ю.С.Немченко, А.И.Сараев Открытая измерительная площадка	46

В.М.Золотарев Решение проблемы создания отечественных электротехнологических комплексов производства кабелей энергетического назначения напряжением до 330 кВ	50
Н.Н.Игнатенко Выбор длины воздушных промежутков разрядников замыкателей нагрузки в кроубар-генераторах импульсного тока молнии	64
С.В.Киприч, Г.М.Колиушко, Д.Г.Колиушко, А.А.Петков Применение метода концевых точек для построения зоны защиты двойного разнотокного стержневого молниеотвода	69
В.В.Князев, В.И.Кравченко, И.П.Лесной, Ю.С.Немченко Экспериментальные исследования метрологических характеристик средств измерения высоких импульсных напряжений на Эталоне-ТН	79
В.В.Князев, Ю.С.Немченко, И.П.Лесной, С.Б.Сомхив, Т.Н.Островерх Установка У-КП-150 для испытаний технических средств устойчивость к кондуктивным помехам в полосе частот от 0 Гц до 150 кГц	85
Ю.В.Ковтун, А.И.Скибенко, Е.И.Скибенко, Ю.В.Ларин, В.Б.Юферов Излучение многокомпонентной плазмы импульсного отражательного ряда	93
А.И.Коробко, З.И.Коробко Методика обработки результатов экспериментальных исследований по определению стойкости радиоэлектронных компонентов к поражающему воздействию электромагнитного излучения, свойственного проявлениям электромагнитного терроризма	100
В.І.Кравченко, А.Е.Горюшкін Обґрунтування вибору імпульсної модуляції для побудови систем передачі з часовим розділенням каналів	105
Б.И.Невзлин, Н.П.Головачев Расчет диэлектрической проницаемости и электропроводности пористого материала	110
О.С.Недзельский, А.В.Пличко, Е.Г.Понуждаева Генератор импульсов тока косвенного воздействия молнии формы «Множественный удар» ГИТ-MS	115
И.И.Обод, Х.Сайед Ахмад, Р. Бута Нана Методы повышения пропускной способности сетей радиодоступа при действии помех	121
И.И.Обод, Ю.Салах Альдин Адаптивный метод повышения скорости передачи данных систем радиодоступа при действии помех	125
М.Ю.Охрименко Розподілена обробка інформації в єдиній інформаційній мережі систем спостереження	130
В.М.Поштаренко, О.Ю.Виноградова, Д.С.Богомаз Оптимізація мереж ip/mppls за продуктивністю на основі імітаційного моделювання	134
О.Л.Резинкин Получение толстых слоев сегнетокерамики методом вакуумного аэрозольного напыления при комнатной температуре	140
В.В.Рудаков Стан та тенденції розвитку високовольних імпульсних конденсаторів	146
В.В.Рудаков, А.И.Коробко, А.А.Коробко Диэлектрический метод опре-	

деления влагосодержания в эмульсиях типа минеральное масло – вода с использованием электрофизической модели эмульсии инженерного типа	154
В.В.Рудаков, А.И.Коробко, А.А.Коробко Электрофизическая модель эмульсии типа минеральное масло – вода инженерного типа	158
С.С.Руденко, А.А.Петков Экспериментальные исследования теплофизических характеристик высоковольтных резисторов ТВО – 60	162
А.А.Серков, Н.Ф.Логвиненко Разработка подходов к созданию теории ценности информации	168
А.А.Серков, В.Я.Певнев, Л.Ю.Нестеренко Методика выбора оптимальной конфигурации системы защиты информации	174
О.Н.Сизоненко, Г.А.Баглюк, А.И.Райченко, А.И.Ивлиев, Е.В.Липян Влияние высоковольтного электрического разряда на изменение композиции поверхности дисперсных порошков 60Fe50TiC и свойств спеченных материалов	177
А.Ю.Скобликов, С.Ю.Скобликов Разработка способа физического моделирования беспроводной сенсорной сети	185
О.О.Тюрін Порівняльний аналіз систем сигналів систем ідентифікації об'єктів на базі фазової та частотної маніпуляції	194
О.В.Хвощан, Ю.И.Курашко, Ю.И.Мельхер, В.В.Литвинов Исследование теплового поля разрядника погружных скважинных комплексов	198

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ХП»

Тематичний випуск
«Техніка і електрофізика високих напруг»

Випуск № ... '2009

Науковий редактор д-р техн.наук,проф. В.І.Кравченко

Технічний редактор Л.В.Ваврів

Відповідальний за випуск В.М.Луцьова

Обл.вид. №

Підп. до друку 00.00.2009 р. Формат 60x84 1/16. Надруковано на цифровому видавничому комплексі Rank Xerox DocuTech 135. Умов.друк.арк. 9,4. Облік. вид. арк. 10,0. Наклад 300 прим. 1-й завод 1-100. Зам. № 147. Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ «ХП».
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 116 від 10.07.2000 р.
61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

Друкарня ТОВ «Сучасний друк», Харків, вул. Лермонтовська, 27
