

## РАСЧЕТ ДОПУСКОВ РАЗРЯДНЫХ ЦЕПЕЙ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Петков А.А., к.т.н., с.н.с.

Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт "Молния" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт"

Украина, 61013, Харьков, ул. Шевченко 47, НИПКИ "Молния"

тел./факс (057) 707-62-80, E-mail: alexp@kpi.kharkov.ua

*У роботі розглянуто вибір допусків елементів розрядного кола випробувального пристрою по відомим допускам на контрольовані параметри імпульсу струму. Наведено співвідношення й розглянута методика розрахунків допусків.*

*В работе рассмотрен выбор допусков элементов разрядной цепи по известным допускам на контролируемые параметры импульса тока. Приведены соотношения и рассмотрена методика расчетов допусков.*

### ВВЕДЕНИЕ

**Постановка проблемы.** Все электротехническое оборудование, применяемое в системах энергогенерирования и электропередачи, в обязательном порядке подвергается испытаниям на устойчивость к воздействию импульсных электромагнитных факторов, сопровождающих их эксплуатацию. Наиболее часто испытания такого рода проводятся с использованием высоковольтных импульсных испытательных устройств (ВИИУ), создаваемых на базе емкостных накопителей энергии (ЕНЭ). ВИИУ формируют нормированные нормативными документами импульсные воздействия (импульсы тока, напряжения, электромагнитного поля или его составляющие), что накладывает достаточно жесткие требования на процесс проектирования ВИИУ и, в частности, на выбор допусков элементов разрядных цепей, которые определяют нормируемые параметры создаваемого импульсного воздействия.

**Анализ публикаций.** Вопросы выбора допусков являются вторым этапом параметрического синтеза разрядной цепи ВИИУ [1]. В общем случае математическая модель набора допусков параметров элементов разрядной цепи имеет вид

$$\overline{D_E} = \Phi(\overline{P_E}, \overline{P_{IV}}, \overline{P_N}, \overline{D_{IV}}, \overline{D_N}), \quad (1)$$

где  $\overline{D_E}$ ,  $\overline{D_{IV}}$ ,  $\overline{D_N}$  – соответственно наборы допусков параметров элементов разрядной цепи, импульсного воздействия и нагрузки;  $\overline{P_E}$ ,  $\overline{P_{IV}}$ ,  $\overline{P_N}$  – соответственно наборы параметров элементов разрядной цепи, импульсного воздействия и нагрузки;  $\Phi(\cdot)$  – оператор, определяемый конкретным видом схемы ВИИУ.

Согласно теории погрешностей вычислений [2], относительное отклонение положительной функции нескольких аргументов  $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  при достаточной малом их отклонении, определяется из соотношения:

$$\delta_y = \sum_{k=1}^n \frac{x_k}{f(x_1, x_2, \dots, x_n)} \cdot \left| \frac{\partial f(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_k} \right| \cdot \delta_{x_k}, \quad (2)$$

где  $\delta_y$  – относительное отклонение функции;  $\delta_{x_k}$  – относительное отклонение  $k$ -го аргумента;  $x_k$  – значение  $k$ -го аргумента, при котором оценивается от-

клонение функции;  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  – значение функции, вычисляемое в точке  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ ;  $\frac{\partial f(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_k}$  – частная производная по  $x_k$ , вычисляемая в точке  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ .

Теоретически, использование (1) и элементов теории чувствительности электронных схем [3] позволяет в первом приближении рассчитать допуски контролируемых параметров импульсного воздействия [4, 5] по известным допускам параметров элементов разрядной цепи. Однако, в настоящий момент, отсутствуют какие-либо соотношения, позволяющие производить практические расчеты для конкретных схемных решений ВИИУ [1].

**Целью** настоящей работы является вывод соотношений и разработка методики, позволяющих проводить расчеты допусков разрядных цепей одноконтурных высоковольтных импульсных испытательных устройств.

### МАТЕРИАЛЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассмотрим эквивалентную схему одноконтурного ВИИУ, представленную на рис. 1. Из материалов, приведенных в [4, 5], контролируемые параметры импульса тока, формируемого в такой схеме, определяются из соотношений:

$$T_{H(0,1;0,9)} = \tau_{H(0,1;0,9)} \cdot \sqrt{L \cdot C}; \quad (3)$$

$$T_{C0,5} = \tau_{C0,5} \cdot \sqrt{L \cdot C}; \quad (4)$$

$$i_{\max} = I_{\max} \cdot \frac{U_C(0)}{\sqrt{\frac{L}{C}}}, \quad (5)$$

где  $i_{\max}$  – максимальное значение импульса тока;  $T_{H(0,1;0,9)}$  – время нарастания значений импульса тока от уровня 0,1 до уровня 0,9 от максимального значения;  $T_{C0,5}$  – время достижения на спаде уровня 0,5 от максимального значения;  $I_{\max}$ ,  $\tau_{H(0,1;0,9)}$ ,  $\tau_{C0,5}$  – безразмерные параметры – аналоги именованных параметров  $i_{\max}$ ,  $T_{H(0,1;0,9)}$ ,  $T_{C0,5}$ .

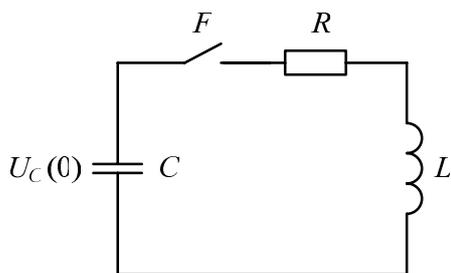


Рис. 1. Эквивалентная схема разряда ВИИУ.  
 $U_C(0)$ ,  $C$ ,  $L$ ,  $R$  – зарядное напряжение конденсатора, емкость конденсатора, индуктивность разрядной цепи, активное сопротивление разрядной цепи;  
 $F$  – коммутатор

Используя методику, изложенную в [4], можно показать, что для вычисления безразмерных параметров импульса тока при  $2 \leq r \leq 30$  имеют место следующие соотношения:

$$\tau_{H(0,1;0,9)} = A_1 \cdot r^{B_1}; \quad (6)$$

$$\tau_{C0,5} = A_2 \cdot r + B_2; \quad (7)$$

$$I_{\max} = A_3 \cdot r^{B_3}, \quad (8)$$

где  $A_1 = 1,065$ ;  $B_1 = -0,7689$ ;  $A_2 = 0,6575$ ;  $B_2 = 1,0924$ ;  $A_3 = 0,7252$ ;  $B_3 = -0,8943$ .

Тогда на основании (2), используя соотношения (3) – (8) и предполагая достаточную малость относительных отклонений параметров элементов разрядной цепи, можно вывести следующие соотношения для определения относительных отклонений контролируемых параметров импульсов тока:

$$\delta_{T_{H(0,1;0,9)}} = a_{1,1} \cdot \delta_R + a_{1,2} \cdot \delta_L + a_{1,3} \cdot \delta_C; \quad (9)$$

$$\delta_{T_{C0,5}} = a_{2,1} \cdot \delta_R + a_{2,2} \cdot \delta_L + a_{2,3} \cdot \delta_C; \quad (10)$$

$$\delta_{i_{\max}} = a_{3,1} \cdot \delta_R + a_{3,2} \cdot \delta_L + a_{3,3} \cdot \delta_C + \delta_{U_C(0)}, \quad (11)$$

где  $\delta_{T_{H(0,1;0,9)}}$ ,  $\delta_{T_{C0,5}}$ ,  $\delta_{i_{\max}}$  – соответственно относительные допуски длительности нарастания, длительности спада и максимального значения тока;  $\delta_{U_C(0)}$ ,  $\delta_R$ ,  $\delta_L$ ,  $\delta_C$  – соответственно относительные допуски на зарядное напряжение, активное сопротивление, индуктивность и емкость; коэффициенты  $a_{ij}$  равны:

$$a_{1,1} = |B_1|; \quad a_{1,2} = 0,5 \cdot |1 - B_1|; \quad a_{1,3} = 0,5 \cdot |1 + B_1|;$$

$$a_{2,1} = \frac{|A_2 \cdot R \cdot C|}{A_2 \cdot R \cdot C + B_2 \cdot L^{0,5} \cdot C^{0,5}};$$

$$a_{2,2} = 0,5 \frac{|B_2 \cdot L^{0,5} \cdot C^{0,5}|}{A_2 \cdot R \cdot C + B_2 \cdot L^{0,5} \cdot C^{0,5}};$$

$$a_{2,3} = \frac{|A_2 \cdot R \cdot C + 0,5 \cdot B_2 \cdot L^{0,5} \cdot C^{0,5}|}{A_2 \cdot R \cdot C + B_2 \cdot L^{0,5} \cdot C^{0,5}};$$

$$a_{3,1} = |B_3|; \quad a_{3,2} = 0,5 \cdot |1 + B_3|; \quad a_{3,3} = 0,5 \cdot |1 + B_3|.$$

Соотношения (9) – (11) выведены в предположении малости  $\delta_{U_C(0)}$ ,  $\delta_R$ ,  $\delta_L$ ,  $\delta_C$ . Произведем некоторую оценку применимости этих соотношений.

На рис. 2 показаны результаты вычисления допуска  $\delta_{T_{H(0,1;0,9)}}$  по формуле (9) (кривая 1) и путем

непосредственного расчета (кривая 2) с использованием всех возможных комбинаций отклонений  $U_C(0)$ ,  $R$ ,  $L$ ,  $C$  (предполагалось, что  $\delta_x = \delta_{U_C(0)} = \delta_R = \delta_L = \delta_C$ ).

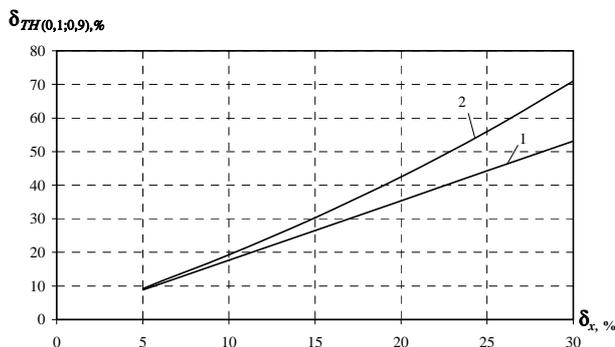


Рис. 2. Зависимость допусков в разрядной цепи

Как видно из рисунка при больших допусках  $\delta_x > 15\%$  на параметры элементов разрядной цепи допуск на контролируемый параметр импульса тока  $T_{H(0,1;0,9)}$ , полученный непосредственным расчетом, может значительно отличаться от допуска, вычисленного по (9).

В дальнейшем для решения задачи выбора допусков элементов разрядной цепи примем, что допуски определяются по соотношениям (9) – (11). Учитывая, что определению подлежат четыре параметра  $\delta_{U_C(0)}$ ,  $\delta_R$ ,  $\delta_L$ ,  $\delta_C$ , а имеется только три уравнения связи между ними (9) – (11), то поставленная задача не имеет однозначного решения, что вызывает необходимость привлечения аппарата математического программирования [6]. В общем случае допуски элементов разрядной цепи могут быть определены из решения следующей задачи оптимизации.

Для заданных значений величин элементов разрядной цепи  $U_C(0)$ ,  $R$ ,  $L$ ,  $C$ , изменяя их допуски  $\delta_{U_C(0)}$ ,  $\delta_R$ ,  $\delta_L$ ,  $\delta_C$ , требуется найти минимум целевой функции

$$F = \left| \delta_{i_{\max}}^* - f(\cdot) \right|, \quad (12)$$

при следующих ограничениях на:

допуски параметров импульса тока

$$\begin{cases} a_{1,1} \delta_R + a_{1,2} \delta_L + a_{1,3} \delta_C \leq \delta_{T_{H(0,1;0,9)}}^*; \\ a_{2,1} \delta_R + a_{2,2} \delta_L + a_{2,3} \delta_C \leq \delta_{T_{C0,5}}^*; \\ a_{3,1} \delta_R + a_{3,2} \delta_L + a_{3,3} \delta_C + \delta_{U_C(0)} \leq \delta_{i_{\max}}^*, \end{cases} \quad (13)$$

и допуски параметров элементов разрядной цепи:

$$\delta_R \geq \delta_R^*; \quad \delta_L \geq \delta_L^*; \quad \delta_C \geq \delta_C^*; \quad \delta_{U_C(0)} \geq \delta_{U_C(0)}^*, \quad (14)$$

где  $f(\cdot)$  – функция, представляющая собой правую часть выражения (11);  $\delta_{T_{H(0,1;0,9)}}^*$ ,  $\delta_{T_{C0,5}}^*$ ,  $\delta_{i_{\max}}^*$  – заданные предельные (максимальные) допуски контролируемых параметров импульса тока;  $\delta_{U_C(0)}^*$ ,  $\delta_R^*$ ,  $\delta_L^*$ ,  $\delta_C^*$  – предельные (минимальные) значения допусков

параметров элементов разрядной цепи, определяемые элементной базой.

Решение данной задачи может быть проведено одним из методов линейного программирования [6]. Достаточно просто поставленная задача может быть решена с использованием команды "Поиск решения" из пакета Excel [7]. Например, при  $\delta_{T_{H(0,1;0,9)}}^* = 20\%$ ,  $\delta_{T_{C0,5}}^* = 20\%$ ,  $\delta_{i_{\max}}^* = 10\%$ , ([8]) и  $\delta_{U_C(0)}^* = 4\%$ ,  $\delta_R^* = 5\%$ ,  $\delta_L^* = 10\%$ ,  $\delta_C^* = 10\%$ . найдено решение (при значении целевой функции  $F = 0$ ) вида:  $\delta_{U_C(0)} = 4,26\%$ ;  $\delta_R = 5,23\%$ ;  $\delta_L = 10,01\%$ ;  $\delta_C = 10,01\%$ . Рассчитанные допуски параметров элементов разрядной цепи могут быть реализованы имеющейся элементной базой [9, 10].

Однако, в общем случае, использование методов оптимизации имеет ряд вычислительных сложностей, а также сложностей интерпретации результатов (при значении целевой функции  $F \neq 0$ ), что предопределяет интерес к формулированию и решению детерминированной задачи.

Величина допуска зарядного напряжения  $\delta_{U_C(0)}$  обычно определяется погрешностью системы измерений и автоматики и, с учетом уровня современной элементной базы и технических решений, может быть достаточно малым, наперед заданным значением. Тогда при фиксированных  $R, L, C$  и априори заданных значениях  $\delta_{U_C(0)}, \delta_{T_{H(0,1;0,9)}}^*, \delta_{T_{C0,5}}^*, \delta_{i_{\max}}^*$ , допуски на параметры элементов разрядной цепи  $\delta_R, \delta_L, \delta_C$ , можно определить из решения системы трех уравнений с тремя неизвестными:

$$\begin{cases} a_{1,1} \cdot \delta_R + a_{1,2} \cdot \delta_L + a_{1,3} \cdot \delta_C = \delta_{T_{H(0,1;0,9)}}^*; \\ a_{2,1} \cdot \delta_R + a_{2,2} \cdot \delta_L + a_{2,3} \cdot \delta_C = \delta_{T_{C0,5}}^*; \\ a_{3,1} \cdot \delta_R + a_{3,2} \cdot \delta_L + a_{3,3} \cdot \delta_C = \delta_{i_{\max}}^* - \delta_{U_C(0)}. \end{cases} \quad (15)$$

Решение системы (15) производится одним из методов, приведенных в [2], и позволяет определить величины допусков на входные параметры. Так, например, при  $R = 10 \text{ Ом}$ ,  $L = 2 \text{ мкГн}$ ,  $C = 3 \text{ мкФ}$  ( $r = 12,5$ ) и допусках на параметры импульса тока и зарядное напряжение  $\delta_{T_{H(0,1;0,9)}}^* = 20\%$ ,  $\delta_{T_{C0,5}}^* = 20\%$ ,  $\delta_{i_{\max}}^* = 10\%$ ,  $\delta_{U_C(0)} = 2\%$ , из решения (15) допуски на параметры элементов разрядной цепи определяются как:  $\delta_R = 7,44\%$ ;  $\delta_L = 12,83\%$ ;  $\delta_C = 12,67\%$ . Если вычисленные допуски превышают реальные допуски имеющейся элементной базы, то, в силу положительности коэффициентов  $a_{i,j}$ , реальные значения допусков на параметры импульса тока уменьшаются. Например, при  $\delta_R = 5\%$ ;  $\delta_L = 10\%$ ;  $\delta_C = 10\%$ , значения допусков, вычисленных по (9) – (11) составят:  $\delta_{T_{H(0,1;0,9)}} = 15\%$ ,  $\delta_{T_{C0,5}} = 15\%$ ,  $\delta_{i_{\max}} = 7,5\%$ , что меньше заданных значений.

Расчеты, проведенные с использованием (15) показывают, что для  $2 \leq r \leq 30$  допуски на параметры импульса тока зависят только от  $r$  и не зависят от конкретных значений  $R, L, C$ .

Это позволяет проанализировать взаимосвязь допусков элементов разрядной цепи для различных наборов допусков контролируемых параметров импульса, имеющих место на практике. Графики, отражающие такую связь, приведены на рис. 3 – рис. 5.

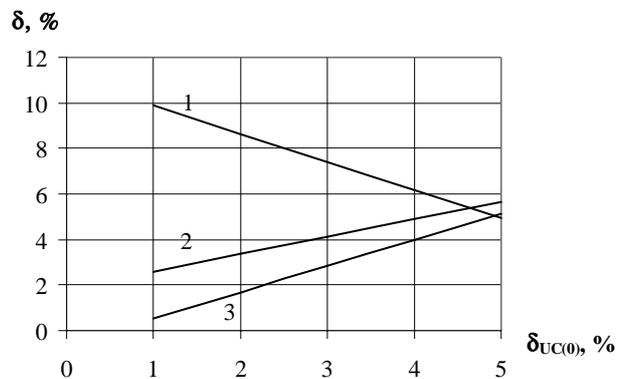


Рис. 3. Зависимость допусков в разрядной цепи для набора допусков параметров импульса вида:

$$\delta_{T_{H(0,1;0,9)}}^* = 10\%, \delta_{T_{C0,5}}^* = 10\%, \delta_{i_{\max}}^* = 10\% \quad ([11]).$$

1 -  $\delta_R$ , 2 -  $\delta_L$ , 3 -  $\delta_C$

Задаваясь значением допуска на зарядное напряжение  $\delta_{U_C(0)}$ , по графикам определяем допуски параметров остальных элементов разрядной цепи для конкретного набора допусков параметров импульса тока.

Выбранные по рис. 3 – рис. 5 допуски, могут быть уменьшены (если позволяет используемая элементная база), что, как отмечалось выше, приведет к уменьшению разброса значений контролируемых параметров импульса. Однако на практике возможна и противоположная ситуация.

Так, например, допуски на емкость высоковольтных импульсных конденсаторов, используемых в разрядных цепях ВИИУ, обычно составляют 10% [11], что, как видно из рисунков, не всегда обеспечивает требуемые значения допусков параметров импульса. В этом случае необходим отбор конденсаторов при входном контроле или включение дополнительных элементов и коммутирующих устройств, позволяющие производить регулирование параметров элементов разрядной цепи.

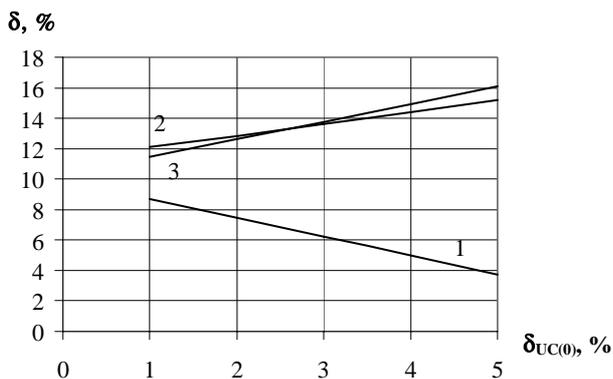


Рис. 4. Зависимость допусков в разрядной цепи для набора допусков параметров импульса вида:

$$\delta_{T_{H(0,1;0,9)}}^* = 20\%, \delta_{T_{C0,5}}^* = 20\%, \delta_{i_{\max}}^* = 10\% \quad ([8]).$$

$$1 - \delta_R, 2 - \delta_L, 3 - \delta_C$$

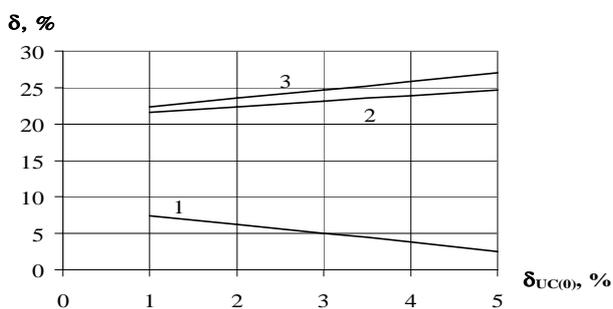


Рис. 5. Зависимость допусков в разрядной цепи для набора допусков параметров импульса вида:

$$\delta_{T_{H(0,1;0,9)}}^* = 30\%, \delta_{T_{C0,5}}^* = 30\%, \delta_{i_{\max}}^* = 10\% \quad ([12]).$$

$$1 - \delta_R, 2 - \delta_L, 3 - \delta_C$$

### ВЫВОДЫ

1. Приведены зависимости для определения контролируемых параметров импульса тока по известным параметрам элементов разрядной цепи одноконтурного высоковольтного импульсного испытательного устройства.

2. Выведены соотношения для определения допусков контролируемых параметров импульса тока.

3. Сформулирована задача выбора допусков элементов разрядной цепи в виде задачи оптимизации, описаны варианты ее решения.

4. Исследована взаимосвязь допусков параметров элементов разрядной цепи для характерных наборов допусков параметров импульса тока.

Приведенные материалы могут быть использованы для анализа допусков ВИИУ с другими схемными решениями их разрядных цепей.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Петков А.А. Параметрический синтез высоковольтных импульсных испытательных устройств // Труды 12-й международной научно-технической конференции "Физические и компьютерные технологии" (7-8 июня 2006 года г. Харьков). – Харьков: ХНПК "ФЭД", 2006. – С. 224 – 226.
- [2] Копченова Н.В., Марон И.А. Вычислительная математика в примерах и задачах. – М.: Наука, 1972. – 367 с
- [3] Гехер К. Теория чувствительности и допусков электронных цепей: Пер. с англ. – М.: Сов. радио, 1973. – 200 с.
- [4] Петков А.А. Расчет параметров разрядной цепи высоковольтных импульсных испытательных устройств, формирующих импульсы апериодической формы // Электротехника та електроенергетика. - 2005. - №1. – С. 65 - 69.
- [5] Петков А.А. Выбор параметров разрядной цепи высоковольтных импульсных испытательных устройств при различных способах задания контролируемых параметров испытательных импульсов // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка і електрофізика високих напруг. – Харків: НТУ "ХПИ". - №17. – 2006. – С. 105 – 111.
- [6] Батищев Д.И. Методы оптимального проектирования: Учеб. пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 1984. – 248 с.
- [7] Коттингхэм М. Excel 2000: руководство разработчика. – К.: Издательская группа ВHV, 2000. – 704 с.
- [8] ГОСТ Р 50932-96 Устойчивость оборудования проводной связи к электромагнитным помехам. Требования и методы испытаний. М.: Издательство стандартов, 1996. – 15 с.
- [9] Резисторы, конденсаторы, трансформаторы, дроссели, коммутационные устройства РЭА: Справочник / Н.Н. Акимов, Е.П. Ващуков, В.А. Прохоренко, Ю.П. Ходоренко. – Мн.: Беларусь, 1994. – 591 с.
- [10] Электрические конденсаторы и конденсаторные установки: Справочник / Берзан В.П., Геликман Б.Ю., Гураевский М.Н. и др. / Под ред. Г.С. Кучинского - М.: Энергоатомиздат, 1987. - 656 с.
- [11] ГОСТ 16357-83 Разрядники вентильные переменного тока на номинальные напряжения от 3,8 до 600 кВ. Общие технические условия. М.: Издательство стандартов, 1983. – 40 с.
- [12] ГОСТ Р 50649-94 Устойчивость к импульсному магнитному полю. Технические требования и методы испытаний. М.: Издательство стандартов, 1994. – 20 с.

Поступила 14.05.2008