

УДК 519.2

**С. П. ШАЛАМОВ****ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ СТЕРЖНЕВОГО И ДИСКОВОГО ШУНТА**

Проведено аналіз конструкцій струмових резистивних перетворювачів, які забезпечують вимір змінних струмів в широкому динамічному (до кількох сотень кілоампер) і частотному діапазонах. Показано підхід до дослідження факторів, що впливають на динамічні характеристики стрижневого і дискового шунтів. Проведено аналіз розподілу температурного поля стрижневого і дискового шунта в програмному пакеті COMSOL Multiphysics. Показано, що температурні поля стрижневого і дискового шунтів має нерівномірний характер через теплоємності матеріалів і вільної конвекції.

**Ключові слова:** електрична модель шунта, стрижневий шунт, дисковий шунт, розподіл температурного поля, розподіл щільності струму, метод кінцевих елементів.

Проведен анализ конструкций токовых резистивных преобразователей, обеспечивающих измерение переменных токов в широком динамическом (до нескольких сот килоампер) и частотном диапазонах. Показан подход к исследованию факторов, влияющих на динамические характеристики стержневого и дискового шунтов. Проведен анализ распределения температурного поля стержневого и дискового шунта в программном пакете Comsol Multiphysics. Показано, что температурные поля стержневого и дискового шунтов имеет неравномерный характер из-за теплоемкости материалов и свободной конвекции.

**Ключевые слова:** электрическая модель шунта, стержневой шунт, дисковый шунт, распределение температурного поля, распределение плотности тока, метод конечных элементов.

This article is dedicated to current sensor using current shunt. Electric current is an important physical quantity and its measurement is required in many applications, be it in industrial, automotive or household fields. Different technical solutions to measure currents are known and are found on the market. This application note is trying to give an overview of measurement device and show their respective advantages and disadvantages. It turns out that due to galvanic isolation between the sensed circuit and the measuring circuitry, current sensor using Hall effect is a good choice for many applications. But current sensor using Hall effect is not a good choice for high current. Rogowsky coil based on the principle of electromagnetic induction has several advantages, such as simplicity of construction, reliability, low cost, no need in a power source and relatively high sensitivity. Rogowsky coil is a good choice when it is impossible to carry out the installation of the shunt. But it has several disadvantages such as a limit of frequency. The next section looks into some aspects for current sensor designs with current shunt sensors, including choices of body types, designs and materials. A current shunt sensor example is presented. This article analyzes a current shunt sensor designed to conduct a pulse current to an electrical device. The current conducted in the current shunt produces heat due to the resistive losses, a phenomenon referred to as Joule heating. The Joule heating effect is described by conservation laws for electric current and energy. Once solved for, the two conservation laws give the temperature and electric field, respectively.

**Keywords:** the electric model of shunt, the core shunt, the shunt disk, the distribution of temperature field, the current density distribution, the finite element method.

**Введение.** При испытаниях различного электроэнергетического оборудования, такого как мощные трансформаторы, силовые размыкатели, коммутаторы, защитные устройства применяют резистивные преобразователи тока. В качестве измерительных преобразователей тока произвольной формы традиционно используются широкополосные импульсные трансформаторы тока, датчики на эффекте Холла, пояс Роговского и резистивные шунты. С помощью трансформаторов тока можно измерять большие токи в широком частотном диапазоне, однако они подвержены влиянию внешних магнитных полей, могут входить в насыщение из-за токов короткого замыкания и имеют сравнительно высокую стоимость. Пояс Роговского требует применения интегрирующего устройства для определения параметров выходного сигнала и имеет узкую полосу передаваемых частот. Перспективными для измерений импульсных и переменных токов остаются датчики Холла, но для них требуются внешние источники питания, и их свойства сильно зависят от температуры.

Наиболее подходящими для измерений больших токов сложной формы являются малоиндуктивные шунты благодаря малой стоимости, высоким метро-

гическим характеристикам и сравнительной простоте изготовления. Шунты обычно имеют сопротивление в диапазоне от 0,1 до 100 мОм, в зависимости от величины тока и значения импеданса цепи, в которую они включаются.

Динамические свойства шунтов зависят от собственной паразитной индуктивности. Такие нежелательные явления как поверхностный эффект и эффект близости также ухудшают характеристики шунта. Применение коаксиальной конструкции резистивного элемента шунта позволяет устранить проявление эффекта близости, повысить помехоустойчивость, уменьшить собственную индуктивность. Поэтому коаксиальные шунты могут обеспечить потенциально более высокие динамические характеристики по сравнению с другими видами шунтов. Помимо этого, для измерения импульсных токов большой амплитуды необходимо учитывать выделение тепла в резистивном элементе. Например, дисковые, кольцевые и трубчатые шунты не могут обеспечить возможность естественного охлаждения в отличие от стержневого шунта [1].

**Цель статьи.** Целью данной статьи является исследование температурного поля стержневого и дис-

кового шунтов с помощью разработки модели в программном пакете Comsol.

**1. Электрическая модель шунта переменного тока.** При расчете шунтов важно определить оптимальные размеры и рационально выбрать материал резистивного элемента, поскольку от этого будет зависеть метрологические характеристики шунта. Геометрические параметры резистивного элемента определяются исходя из максимального тока и, следовательно, мощность рассеиваемого им тепла.

Шунт переменного тока описывается стандартной электрической моделью, состоящей из активного сопротивления  $R_{ш}$ , индуктивности  $L$  и емкости  $C$  (див. рис. 1).

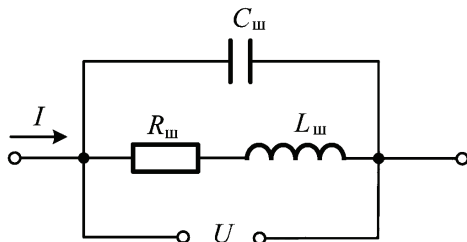


Рисунок 1 – Электрическая модель шунта переменного тока

Комплексный коэффициент преобразования  $Z$  шунта определяется выражением [2]:

$$\dot{Z} = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = R_{ш} + j\omega L = ze^{j\varphi}, \quad (1)$$

где  $\omega L$  – реактивная составляющая, вызванная влиянием остаточного магнитного поля;  $z$  – модуль коэффициента преобразования шунта;  $\varphi$  – угол фазового сдвига между векторами тока  $I$  и напряжения  $U$ .

Отношение комплексного коэффициента преобразования  $Z$  к активному сопротивлению  $R_{ш}$  (на постоянном токе) можно представить в виде [2]:

$$\frac{\dot{Z}}{R_{ш}} = 1 + \frac{R_{ш}}{\Delta R} + j\Psi, \quad (2)$$

где  $R_{ш}/\Delta R$  – относительная активная составляющая погрешности, учитывающая изменение комплексного коэффициента преобразования шунта  $Z$ , вызванная влиянием паразитных эффектов;  $\Delta R$  – приращение активного сопротивления за счет проявления паразитных эффектов (поверхностного эффекта и эффекта близости);  $\Psi$  – реактивная составляющая погрешности, учитывающая изменение комплексного коэффициента преобразования шунта  $Z$ , вызванная влиянием паразитного магнитного поля.

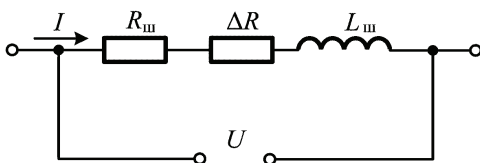


Рисунок 2 – Электрическая модель шунта

В соответствии с выражением (2) общая модель принимает вид, представленный на рис. 2. Соответст-

вующая ей векторная диаграмма шунта показана на рис. 3 [2].

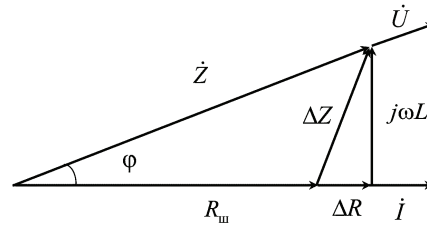


Рисунок 3 – Векторная диаграмма шунта

Эквивалентная схема шунта с учетом измерительного кабеля и входных параметров электронного осциллографа приведена на рис. 4, где  $Z_0$  – волновое сопротивление измерительного кабеля,  $R_{ш}$  – сопротивление шунта,  $L_{ш}$  – индуктивность шунта,  $C_r$  – входная емкость осциллографа,  $R_r$  – входное сопротивление осциллографа. Поскольку  $R_r = 1$  Мом, его можно не учитывать при расчетах.

Дифференциальное уравнение для выходного напряжения шунта имеет вид [1]:

$$\frac{d^2 U_C(t)}{dt^2} + 2 \cdot \delta \cdot \frac{dU_C(t)}{dt} + \omega^2 \cdot U_C(t) = \frac{R}{L \cdot C} \cdot J(t) + \frac{1}{C} \frac{dJ(t)}{dt}; \quad (3)$$

$$\delta = \frac{R + Z_0}{2L}, \quad (4)$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}, \quad (5)$$

где  $U_C(t)$  – напряжение на емкости;  $J(t)$  – измеряемый ток.

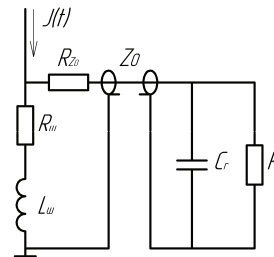


Рисунок 4 – Эквивалентная схема измерений

Решение дифференциального уравнения при нулевых начальных условиях имеет вид [1]:

$$U_C(t) = \frac{R - Z_0}{\omega^2 \sqrt{\delta^2 - \omega^2}} \int_0^t J(z) \cdot e^{-\delta(t-z)} \cdot \sinh(\sqrt{\delta^2 - \omega^2} \cdot (t-z)) \cdot dz + \frac{1}{C} \int_0^t J(z) \cdot e^{-\delta(t-z)} \cdot \cosh(\sqrt{\delta^2 - \omega^2} \cdot (t-z)) \cdot dz. \quad (6)$$

Исследование передаточных свойств шунта методом переходной характеристики затруднено. Если предположить, что измеряемый ток имеет вид единичного скачка, за счет индуктивного падения напряжения получим напряжение с огромным выбросом.

Для анализа передаточных свойств шунта прямоугольный импульс тока заменяется импульсом с конечной длительностью фронта [3]. Аналитическое выражение для такого импульса имеет вид:

$$J(t) = A \cdot e^{-\alpha t} - B \cdot e^{-\beta t}. \quad (7)$$

Для импульса с  $A = 1$ ,  $B = 1$ ,  $\beta = 0,8 \cdot 10^7$ , график которого приведен на рис. 5 (кривая 1), время нарастания импульса составляет  $T_{\Phi(0,1+0,9)} = 275$  нс.

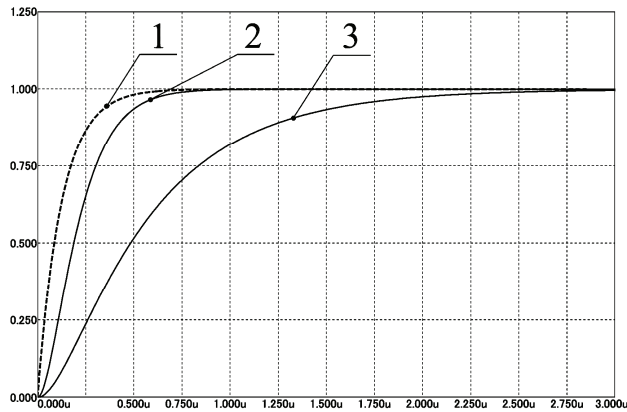


Рисунок 5 – Рассчитанная характеристика шунта: 1 – импульс тока; 2 – реакция шунта,  $L_{ш} = 10$  нГ; 3 – реакция шунта,  $L_{ш} = 50$  нГ; масштаб по вертикали – относительные единицы; масштаб по горизонтали – 200 нс/клетка

Время нарастания напряжения на экране осциллографа составляет: 1) для  $L_{ш} = 10$  нГ  $T_{(0,1+0,9)} = 380$  нс; 2) для  $L_{ш} = 50$  нГ  $T_{(0,1+0,9)} = 1,16$  мкс.

**2. Область применения.** Шунт предназначен для измерения с погрешностью до 10 % апериодических грозовых импульсов тока. Согласно [4-8] временная форма таких испытательных импульсов тока должна соответствовать  $\tau_f/\tau_p = 10\text{мкс}/350\text{мкс}$ , где  $\tau_f$ ,  $\tau_p$  – соответственно длительность фронта (с допуском  $\pm 20\%$ ) и длительность импульса (с допуском  $\pm 10\%$ ) тока с амплитудой  $I_m = \pm(100-200)$  кА (с допуском  $\pm 10\%$ ). Существуют [1-5] четыре степени жесткости испытаний технических объектов на молниестойкость. Для каждого уровня жесткости указаны амплитудно-временные параметры испытательного импульса тока [1-5]: I уровень –  $I_m = \pm 200$  кА (с допуском  $\pm 10\%$ ); удельная энергия (интеграл действия тока молнии)  $J = 10 \cdot 10^6$  А<sup>2</sup>·с (с допуском  $\pm 35\%$ ); протекший заряд  $q = \pm 100$  Кл (с допуском  $\pm 20\%$ ); II уровень –  $I_m = \pm 150$  кА (с допуском  $\pm 10\%$ ); удельная энергия (интеграл действия тока молнии)  $J = 5,6 \cdot 10^6$  А<sup>2</sup>·с (с допуском  $\pm 35\%$ ); протекший заряд  $q = \pm 75$  Кл (с допуском  $\pm 20\%$ ); III-IV уровни –  $I_m = \pm 100$  кА (с допуском  $\pm 10\%$ ); удельная энергия (интеграл действия тока молнии)  $J = 2,5 \cdot 10^6$  А<sup>2</sup>·с (с допуском  $\pm 35\%$ ); протекший заряд  $q = \pm 50$  Кл (с допуском  $\pm 20\%$ ).

**3. Результаты численного моделирования.** Температурное поле коаксиального шунта описывается сложными дифференциальными уравнениями, получение аналитического решения которых вызывает затруднения, особенно при рассмотрении трехмерного случая. В настоящее время существуют программные

продукты, позволяющие провести расчеты распределения температурного поля резистивных шунтов. Была выбрана программа Comsol Multiphysics, которая реализует метод конечных элементов, позволяющая рассчитать тепловое поле шунта, имеющего сложную геометрию. Основными этапами расчета в программном комплексе Comsol Multiphysics являются: 1) построение геометрии исследуемого объекта; 2) ввод свойств материалов; 3) формирование граничных условий; 4) генерация сетки конечных элементов; 5) проведение расчета; 6) визуализация и анализ результатов.

В программном комплексе Comsol Multiphysics определение джоулева тепла проводится посредством модуля расчета электрических параметров Джоулев нагрев с использованием модуля *Time Dependent*. Явление Джоулева нагрева описывается законами сохранения электрического заряда и энергии. После решения уравнений по этим двум законам будут получены параметры температуры. Построение геометрии конструкции коаксиального шунта возможно с помощью встроенного модуля. Также возможен импорт готовой геометрии. Граничными условиями являются значение постоянного тока, приложенного к токовому выводу, и нулевое значение потенциала на выводе заземления. Вторым граничным условием при расчете температурного поля является часть поверхности шунта, подверженная естественному охлаждению, которое осуществляется за счет свободного перемещения воздуха в окружающей среде. Таким образом, в качестве второго граничного условия выбрана вся внешняя поверхность моделируемого шунта. При разбиении расчетной области на конечные элементы в процессе исследования температурного поля коаксиального шунта использовалась стандартная сетка, для которой был задан размер конечных элементов 0,01. При этом число расчетных узлов (Nodes) составило 111751, число элементов (Elements) – 19653, что позволило достичь приемлемого качества решения. Конструкция исследуемого стержневого шунта представлена на рис. 6.

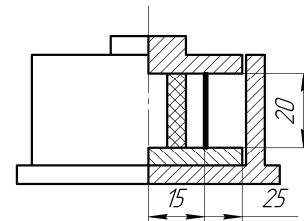


Рисунок 6 – Конструкция исследуемого стержневого шунта

При моделировании были добавлены свойства материалов – нихрома и меди. Сгенерированная сетка конечных элементов модели шунта представлена на рис. 7.

Определение джоулева тепла и распределения температурного поля осуществлялось для всей поверхности шунта. Визуализация результата расчета джоулева тепла для конструкции шунта представлена на рис. 8 (показан разрез шунта без внешнего корпуса). Темная область имеет максимальную температуру.

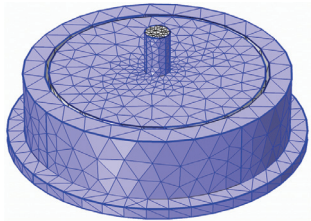


Рисунок 7 – Сгенерированная сетка стержневого шунта

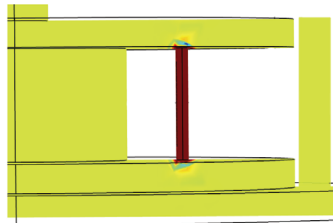


Рисунок 8 – Распределение температурного поля шунта

Расчет максимальной температуры конструкции шунта при токе 100 кА и сопротивлении резистивного элемента  $R_{ш} = 280$  мкОм в зависимости от времени представлено на рис. 9. Расчет максимальной температуры конструкции шунта при токе 150 кА представлено на рис. 10.

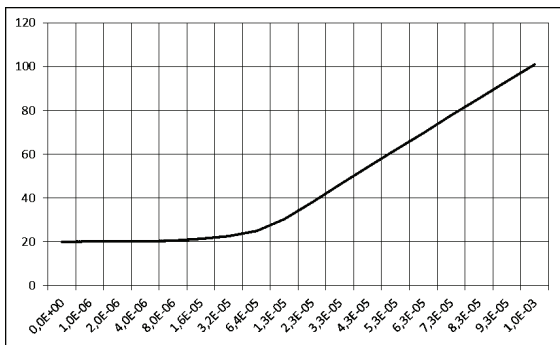


Рисунок 9 – Распределение температурного поля шунта при токе 100 кА

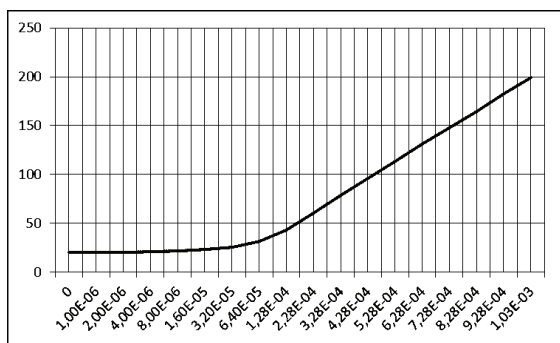


Рисунок 10 – Распределение температурного поля шунта при токе 150 кА

Температура имеет максимальное значение в центре резистивной проволоки. Распределение плотности тока приведено на рис. 11. Светлая область имеет максимальную плотность тока.

Конструкция стержневого шунта типа «беличье колесо» приведен на рис. 12. Шунт состоит из трех пластин круглой формы, между которыми установлены резисторы по схеме параллельного включения.

Такая конструкция шунта позволяет минимизировать паразитные индуктивности и емкости; взаимную индуктивность между цепями тока и напряжения; токи утечки и другие. Основное достоинство шунтов конструкции «беличье колесо» в том, что они способны рассеивать большие мощности и используются для измерений переменных токов до десятков и сотен килоампер. Недостатками такой конструкции при измерении больших токов являются большие габаритные размеры и проявление поверхностного эффекта даже при промышленных частотах.

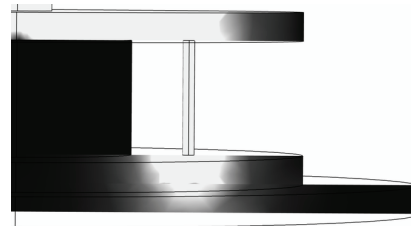


Рисунок 11 – Распределение температурного поля стержневого шунта

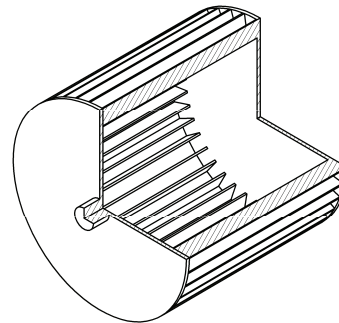


Рисунок 12 – Конструкция исследуемого дискового шунта

Распределение температурного поля стержневого шунта приведено на рис. 13 (Максимальная температура в светлой области).

Расчет максимальной температуры конструкции шунта при токе 200 кА и сопротивлении резистивного элемента  $R_{ш} = 280$  мкОм в зависимости от времени представлено на рис. 14.



Рисунок 13 – Распределение температурного поля шунта

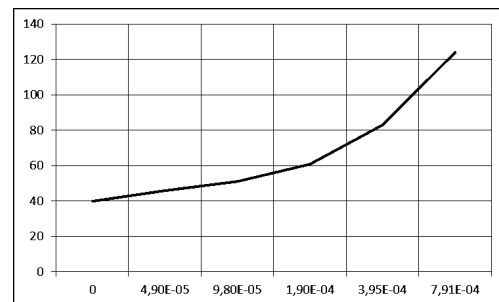


Рисунок 14 – Распределение температурного поля шунта при токе 100 кА

Конструкция исследуемого дискового шунта представлена на рис. 15.

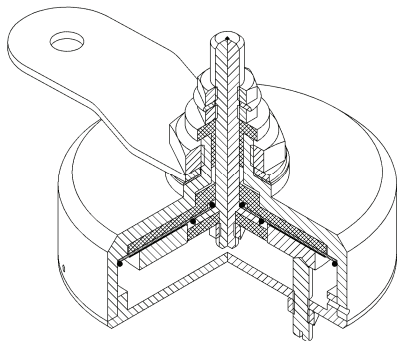


Рисунок 15 – Конструкция исследуемого дискового шунта

Визуализация результата расчета джоулева тепла (сечение резистивной пластины, 1/4 диска) представлена на рис. 16. Светлая область имеет максимальную температуру.



Рисунок 16 – Распределение температурного поля дискового шунта на резистивной пластине

Расчеты были проведены при воздействии постоянного тока. В итоге получена зависимость изменения температуры от времени. Если ток через шунт является периодическим импульсным, благоприятный режим для шунта, с точки зрения охлаждения, обеспечивается при периоде следования импульсов, равном времени охлаждения шунта до его первоначальной температуры. Если же шунт не успевает охладиться до первоначальной температуры, то для каждого следующего импульса начальной температурой является температура, до которой шунт охладится после окончания действия предыдущего импульса. Такой кумулятивный процесс происходит до тех пор, пока не наступит квазистационарное состояние температуры, когда повышение температуры за время действия импульса становится равным температуре, полученной за период следования. При периодическом импульсном сигнале с указанными выше параметрами квазистационарное состояние температуры не было получено из-за ограниченных возможностей используемого персонального компьютера.

**Выводы.** При протекании электрического тока равномерное теплоты в резистивном элементе шунта приводит к его неравномерному нагреву. Максимальная температура нагрева для стержневого шунта имеет место в центре резистивного элемента и уменьшается к краям. Это обусловлено наличием естественной

конвекции и теплоемкости используемых материалов. Максимальная температура нагрева для дискового шунта имеет место в области ввода тока в резистивный элемент. Неравномерный нагрев резистивного элемента шунта нежелателен, поскольку неравномерность температурного поля вызывает внутренние механические напряжения в резистивном элементе при изменении значения тока в шунте, приводя к нелинейному характеру зависимости комплексного коэффициента преобразования шунта от температуры.

Результаты моделирования показывают, что стержневые шунты с резистивным элементом в виде проволоки применимы для измерения токов амплитудой до 100 кА, несмотря на то, что они имеют возможность естественного охлаждения. Резистивный элемент дискового шунта не имеют возможности охлаждаться естественным путем, поэтому для обеспечения теплоотвода, при измерении импульсов большой амплитуды, необходимо принимать дополнительные меры.

#### Список литературы

1. Донец С.Е. Стержневой шунт для измерения сильных токов микросекундной длительности / С.Е. Донец, В.В. Леденев, В.В. Литвиненко // Вестник НТУ «ХПИ». – 2008. – № 44. – С. 39–44.
2. Бедарева Е.В. Исследование распределения температурного поля коаксиального шунта методом конечных элементов / Е.В. Бедарева, Е.В. Костин // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322. – № 4. – С. 159-164
3. Шваб А. Измерения на высоком напряжении / А.Шваб. - М.: Энергоатомиздат, 1983. – 264 с.
4. IEC 62305-1: 2010 "Protection against lightning. Part 1: General principles".
5. IEC 62305-2: 2010 "Protection against lightning. Part 2: Risk management".
6. IEC 62305-3: 2010 "Protection against lightning. Part 3: Physical damage to structures and life hazard".
7. IEC 62305-4: 2010 "Protection against lightning. Part 4: Electrical and electronic systems within structures".
8. Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р МЭК 62305-1-2010. "Менеджмент риска. Защита от молнии. Часть 1: Общие принципы". – М.: Стандартинформ, 2011. – 46 с.

#### References (transliterated)

1. Donec S.E. V.V. Ledenev, V.V. Litvinenko Sterzhnevoj shunt dlja izmerenija sil'nyh tokov mikrosekundnoj dlitel'nosti [Shunt for measuring low currents of microsecond duration]. Visnyk NTU "KhPI" [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Available at: <http://vestnik.kpi.kharkov.ua>.
2. Bedareva E.V., Kostin E.V. Issledovanie raspredelenija temperaturynogo polja koaksial'nogo shunta metodom konechnyh jelementov [The study of the temperature field distribution of the coaxial shunt finite element method] Visnyk of Tomsk polytechnic university [Bulletin of the Tomsk polytechnic university]. Available at: <http://tpu.ru>. (Rus).
3. Shvab A. Izmerenija na vysokom naprjazhenii [High voltage measuring]. Moscow, Jenergoatomizdat Publ., 1983, 264 p.
4. IEC 62305-1: 2010 "Protection against lightning. Part 1: General principles".
5. IEC 62305-2: 2010 "Protection against lightning. Part 2: Risk management".
6. IEC 62305-3: 2010 "Protection against lightning. Part 3:

Physical damage to structures and life hazard".

7. IEC 62305-4: 2010 "Protection against lightning. Part 4: Electrical and electronic systems within structures".

8. Nacional'nyj standart Rossijskoj Federacii GOST R MEK 62305-1-2010. "Menedzhment riska. Zashhita ot molnii.

Chast' 1: Obshhie principy" [National Standard of the Russian Federation GOST R IEC 62305-1-2010. Risk management. Protection from lightning. Part 1: General principles]. Moscow, Standartinform Publ., 2011, 46 p. (Rus).

Поступила (received) 07.11.2016

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Дослідження температурного поля стрижневого і дискового шунта / С. П. Шаламов** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 36 (1208). – С. 91-96. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-0740.

**Исследование температурного поля стержневого и дискового шунта / С. П. Шаламов** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 36 (1208). – С. 91-96. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-0740.

**A study of the temperature field of the rod shunt and disk shunt / S. P. Shalamov** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. – № 36 (1208). – С. 91-96. – Bibliogr.: 8. – ISSN 2079-0740.

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Шаламов Станіслав Павлович** – аспірант, молодший науковий співробітник, Національний технічний університет «ХПІ»; тел.: 066-62-60-187; e-mail: shalamov.stas@mail.ru.

**Шаламов Станіслав Павлович** – аспірант, младший научный сотрудник, Национальный технический университет «ХПИ»; тел.: 066-62-60-187; e-mail: shalamov.stas@mail.ru.

**Shalamov Stas Pavlovich** – Postgraduate Student, Research Assistant, National Technical University "KhPI"; tel.: 066-62-60-187; e-mail: shalamov.stas@mail.ru.