

*С. С. РУДЕНКО*, магистрант, НТУ "ХПИ", Харьков  
*А.А. ПЕТКОВ*, канд. техн. наук, с.н.с., НТУ "ХПИ", Харьков

## **ЭЛЕКТРОТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ РЕЗИСТОРОВ**

У роботі наведений аналіз публікацій, що присвячені електротепловому розрахунку резисторів. Визначені напрями подальших досліджень, що забезпечать загальність підходів до розрахунку резисторів, які використовуються у високовольтних імпульсних випробувальних установках.

В работе приведен анализ публикаций, посвященных электротепловому расчету резисторов. Определены направления дальнейших исследований, которые обеспечат общность подходов к расчету резисторов, используемых в высоковольтных импульсных испытательных установках

**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.

**Целью** настоящей работы является определение направления исследований, обеспечивающих общность подходов к расчету тепловых режимов высоковольтных резисторов, в режимах эксплуатации характерных для ВИИУ.

**Анализ публикаций.** В ВИИУ наиболее широкое применение нашли резисторы промышленного изготовления типов ТВО, КЭВ, а также проволочные и жидкостные резисторы, изготавливаемые индивидуально.

В технических условиях на резисторы типа ТВО [1] оговорены тепловой режим работы резисторов и их перегрузочные характеристики в импульсных режимах. При средней мощности равной номинальной, резисторы должны выдерживать воздействия импульсной нагрузки с параметрами:

- длительность импульса от 1 до 50 мкс;
- коэффициент перегрузки по импульсной мощности до 1000;
- период повторения импульса не менее 50 мкс.

Максимально-допустимая рабочая температура при снижении мощности рассеивания – 155 °С.

Указанных данных в общем случае не достаточно для проведения расчета теплового режима работы резисторов типа ТВО, что предопределило дальнейшие исследования, результаты которых нашли отражение в публикациях [2 – 4].

В [2] описана методика испытаний резисторов, получены экспериментальные данные по их перегрузочной способности при электро-тепловой нагрузке и определены некоторые теплофизические характеристики (ТФХ) для объемных резисторов типа ТВО – 1, ТВО – 2, ТВО – 5, ТВО – 20. В частности было показано, что постоянные времени нагрева для данных типов резисторов соответственно равны 40, 42, 76 и 127 сек.

В [3] опытным путем было определено предельное значение рассеиваемой импульсной мощности и энергии для резисторов типа ТВО – 60 – 24 Ом. Экспериментально показано, что при импульсном аperiodическом токе нано- и микросекундного временного диапазона значение однократно рассеиваемой импульсной тепловой энергии составляет порядка 5 кДж, длительно допустимая рассеиваемая при однократном разряде импульсная тепловая энергия – 3кДж, а пиковая импульсная мощность рассеяния при этом может достигать 20 МВт.

Для резисторов типа ТВО – 10 – 27 были проведены испытания по определению количественных оценок показателей надежности [4]. Показано, что при импульсном напряжении до 4 кВ и средней рассеиваемой мощности до 6,7 Вт резисторы допускают надежную работу при адиабатическом поглощении энергии импульса до 800 Дж, а при напряжении до 10 кВ и средней рассеиваемой мощности до 7,7 Вт поглощаемая энергия импульса может достигать 600 Дж.

В работе [5] были определены ТФХ резисторов типа С 5 – 5 с номинальной мощностью в 1, 2, 5, 8 и 10 Вт. Методика измерения ТФХ заключалась в снятии экспоненциальной зависимости температуры резистивного элемента (РЭ) от времени нахождения под нагрузкой, с

последующим расчетом теплоемкости резистора и теплового сопротивления РЭ – внешняя среда.

Проблема теплового расчета резисторов индивидуального изготовления отражена в работе [6], в которой был рассмотрен процесс нагрева резисторов и приведены методы теплового расчета проволочного и жидкостного резисторов, используемых в генераторах импульсных напряжений.

Описана методика теплового расчета разрядных резисторов проволочного исполнения при многократном протекании чередующихся импульсов тока.

Показано, что определение коэффициента теплоотдачи, характеризующего охлаждение проводника, представляет наибольшую трудность теплового расчета [6].

В работе приведена методика, позволяющая определить коэффициент теплоотдачи и другие ТФХ резисторов (постоянная нагрева, теплоемкость), необходимых для расчета их теплового режима. Приведен пример расчета проволочного резистора сопротивлением 3000 Ом. Резистор выполнен из нихромовой проволоки, намотанной на бумажно-бакелитовый каркас с наружным диаметром 70 мм и внутренним 60 мм, имеет постоянную нагрева, равную 882 с и установившуюся температуру, равную 68 °С, при прикладываемом напряжении 300 кВ и подводимой средней мощности 15,2 Вт.

Для жидкостного резистора, выполненного в виде стеклянной трубки, заполненной водой, проведен тепловой расчет при средней мощности рассеивания 300 Вт. Внутренний и внешний диаметры трубки соответственно были равны 2,75 см и 3,35 см, длина – 100 см. Коэффициент теплоотдачи от воды к стенке стеклянной трубки – 0,0194 Вт/см<sup>2</sup>·град., а от трубки к окружающей атмосфере – 0,0053 Вт/см<sup>2</sup>·град., общий перепад температуры в резисторе составит 44,3 °С.

Проведенный анализ показывает, что имеющиеся данные позволяют производить тепловой расчет некоторых типов высоковольтных резисторов в отдельных режимах их эксплуатации. Учитывая, что рассмотренные типы резисторов и режимы эксплуатации не охватывают всю область, характерную для ВИИУ, целесообразным является проведение дальнейших исследований, направленных на разработку обобщенных методов расчета тепловых режимов высоковольтных резисторов.

**Материалы и результаты исследований.** Проведенный анализ показывает, что вся имеющаяся информация по определению электро-теплового режима высоковольтных резисторов, используемых в ВИИУ, может быть распределена на три потока, как показано на рис. 1.



Рис. 1.

Первый поток содержит экспериментальные данные по перегрузочной способности и ТФХ высоковольтных резисторов в импульсных режимах эксплуатации. Данная информация содержится в нормативных документах на резисторы промышленного изготовления [1] и ряде публикаций, отражающих результаты экспериментальных исследований [2 – 6].

Данный поток информации характеризуется следующим:

- 1) для резисторов промышленного изготовления, наличием
  - наличием полных данных, обеспечивающих определение электротеплового режима, только для отдельных режимов эксплуатации резисторов [1, 4];
  - формально заявленными данными по ТФХ резисторов, требующих дополнительного экспериментального подтверждения [2];
  - наличием данных по предельным энергетическим нагрузкам, не подтвержденных статистическими испытаниями [3];
- 2) для высоковольтных резисторов индивидуального изготовления наличием полных данных для электротеплового расчета резисторов, с использованием в качестве корпуса жидкостных резисторов стеклянной трубки, а в проволочных резисторах бумажно-бакелитовых каркасов.

Имеющаяся информация показывает наличие ряда проблем, затрудняющих проведение электротепловых расчетов высоковольтных резисторов. Для их решения необходимо:

- 1) провести экспериментальные исследования по определению отсутствующих теплофизических характеристик высоковольтных резисторов, а также материалов и изделий, используемых при их изготовлении;

2) исследовать распределения теплового поля для конструкций резисторов индивидуального и основных типов высоковольтных резисторов промышленного изготовления;

3) разработать методику оценки перегрузочной способности резисторов промышленного изготовления при различных импульсных режимах эксплуатации.

Второй поток содержит информацию по определению ТФХ и перегрузочной способности резисторов. Он характеризуется достаточно полной проработкой всех вопросов [2, 4, 5] и, в условиях применения, требует лишь корректировки под конкретные режимы и условия эксплуатации резисторов.

Третий поток содержит информацию о методах электротеплового расчета высоковольтных резисторов. Он характеризуется наличием методов, в которых используются математические модели, имеющие существенные ограничения [6], например, в них не учитывается: отвод тепла в аксиальном направлении через торцевые поверхности, влияние расположения резистора в пространстве и методы крепления к конструкции ВИИУ, неравномерное тепловыделение и др.

Для разработки обобщенных методов расчета электротеплового режима резисторов, в первую очередь необходимо дополнить этот поток информации следующими данными:

1) учетом влияния на тепловой режим высоковольтных резисторов условий их расположения в конструкции высоковольтных устройств;

2) методиками оптимизации основных конструкций резисторов индивидуального изготовления по электротепловым характеристикам.

### **Выводы.**

1. Проведен анализ информации по определению электротеплового режима высоковольтных резисторов.

2. Определены направления дальнейших исследований, которые обеспечат общность подходов к электротепловым расчетам высоковольтных резисторов.

**Список литературы:** 1. ОЖО. 467. 121 ТУ. Технические условия. Резисторы постоянные непроволочные ТВО. – С. 4-2. 2. *Зинкевич Н.М.* Перегрузочная способность резисторов // Электронная техника. – 1970. – №1. – С. 73-83. 3. Баранов М.И., Бочаров В.А., Носенко М.А. Предельные характеристики по рассеиваемой импульсной мощности и энергии высоковольтных керамических объемных резисторов типа ТВО – 60 // Вестник Национального технического университета "Харьковский политехнический институт". Сб. науч. тр. Тематический выпуск: Техника и электрофизика высоких напряжений. – Харьков: НТУ

"ХПИ". – №20. – 2007. – С. 45 – 55. **4. Петков А.А.** Усовершенствование разрядных цепей генераторов больших импульсных токов с учетом критериев их надежности: Дис. ... канд. техн. наук: 05.09.13. – Харьков, 2004. – 205 с. **5. Караев Г.С., Квятковский В.А., Ловков В.А.** Способ экспериментально-расчетного определения тепловых параметров резисторов // Электронная техника. – 1980. – С. 24 – 26. **6. Смирнов С.М., Терентьев П.В.** Генераторы импульсов высокого напряжения. – М.: Энергия, 1964. – 240 с.



**Руденко Сергей Сергеевич** магистрант. Защитил диплом бакалавра в национальном техническом университете "Харьковский политехнический институт", по специальности техника и электрофизика высоких напряжений, в 2008 г.



**Петков Александр Александрович**, старший научный сотрудник, кандидат технических наук. Защитил диплом инженера, диссертацию кандидата технических наук в Харьковском политехническом институте по специальности техника сильных электрических и магнитных полей, соответственно в 1977 и 2004 гг. Докторант Национального технического университета "Харьковский политехнический институт".

Научные интересы связаны с проблемами техники сильных электрических и магнитных полей.

*Поступила в редколлегию 19.06.2009*