

УДК 621.3.002.5:536.24

Исследование термических характеристик оксидно-цинковых резисторов в импульсных режимах с помощью тепловизионных устройств

О. И. Абрамов, В. А. Алмазов, Н. Н. Горбачевская,
И. Н. Дулькин, В. И. Завадская, Г. Г. Лаврентьев,
Д. И. Овчаров, И. В. Овчаров, Е. К. Орнат

ГУП "Всероссийский электротехнический институт им. В. И. Ленина", Москва, Россия

С помощью трех типов тепловизоров исследованы термические характеристики оксидно-цинковых резисторов (ОЦР) в импульсных режимах с использованием различных подходов. Полученные экспериментально переходные характеристики сопоставлены с результатами аналитического исследования. Итоги работы могут быть использованы при совершенствовании ограничителей перенапряжений.

В настоящее время ИК-методы прошли стадию лабораторной проработки и узаконены, в частности, Департаментом стратегии развития и научно-технической политики РАО «ЕЭС России» [1, 2]. Весьма актуально применение этих методов для контроля ограничителей перенапряжений (ОПН), основными рабочими элементами которых являются ОЦР, снижающие перенапряжения в 10 раз и более. Конструктивно они оформлены как шайбы (таблетки) диаметром 60 или 78 мм и толщиной 6–10 мм, на торцы которых напылены тонкие электроды. Надежность ОПН, использующих в качестве нелинейного рабочего сопротивления ОЦР, в значительной мере определяется стабильностью их параметров в процессе эксплуатации. Деградация характеристик ОЦР под воздействием рабочего напряжения, развивающаяся на фоне воздействия других эксплуатационных факторов (температура, перенапряжение и т. п.), вызывает рост мощности потерь в ОЦР, что в конечном счете может привести к нарушению теплового равновесия и отказу ОПН [3, 4].

Путем измерений на отдельной таблетке решались две задачи: первая состояла в сравнении результатов бесконтактных и контактных измерений температуры поверхности таблетки; вторая — в изучении равномерности распределения электропроводности по площади отдельной таблетки ОЦР, определяемой путем измерения распределения температуры по радиусу таблетки. Неравномерность этого параметра существенно влияет на срок службы ОПН.

Предварительно на таблетке ОЦР проведены измерения температур поверхности в нескольких точках как контактным (с помощью термопар), так и бесконтактным (с помощью тепловизора АГЕМА-782) методом.

Тепловизору АГЕМА-782 требуется для работы жидкий азот, что неудобно в производственных условиях. Поэтому в ВЭИ был создан линейный ИК-сканер с неохлаждаемым приемником излучения — прибор, занимающий промежуточное положение между тепловизором и пирометром по информативности и стоимости [5]. Разработаны оптическая и принципиальная электрическая схемы макетного образца такого сканера. Использован неохлаждаемый пироэлектрический приемник излучения МГ-30 с регулируемой постоянной времени. В оптической системе применены параболическое зеркало с фокусным расстоянием 300 мм и сканирующий контррефлектор.

На рис. 1 показана структурная схема стенда. Сканер работает в однострочном режиме, частота развертки 3,25 Гц, эквивалентная шуму разность температур составляет 1 К, мгновенное поле зрения 3,3 мрад. Строка проходит через центр таблетки ОЦР. Расстояние между объектом и камерой составляет 1,2 м. С помощью лабораторного макета сканера проведено исследование импульсного нагрева ОЦР. Сразу после пропускания через ОЦР испытательного импульса амплитудой 2 кА и продолжительностью 2 мс с помощью запоминающего осциллографа фиксировалось распределение температуры по диаметру таблетки ОЦР. Затем ОЦР поворачивали на 90°, давали второй импульс и фиксировали строку, перпендикулярную первой. Практически двух строк было достаточно для выявления неравномерности распределения температуры по торцевой поверхности таблетки ОЦР.

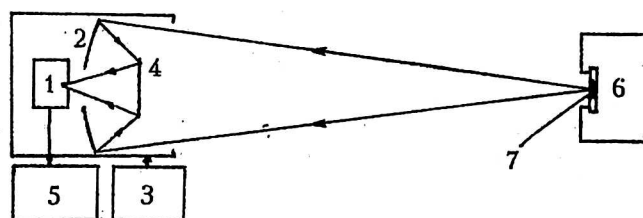


Рис. 1. Структурная схема стенда для исследования распределения локальной электрической проводимости ОЦР по распределению температуры поверхности:

1 — приемник излучения; 2 — параболическое зеркало; 3 — генератор развертки; 4 — сканирующее зеркало; 5 — запоминающий осциллограф; 6 — высоковольтный блок; 7 — ОЦР

При этом на части исследованных ОЦР наблюдалась неравномерность распределения превышения температуры над температурой окружающего воздуха, достигающая 30 % (рис. 2, Б-Б). Обнаружено, что на площади поверхности, составляющей около 50 % поверхности ОЦР, перегрев превышал средний более чем на 20 %. Методы установления связи между локальной электропроводностью и превышением температуры поверхности таблетки представлены в работах [6, 8].

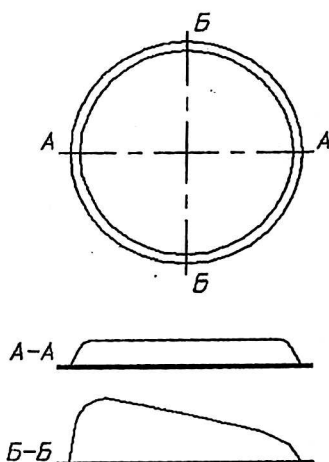


Рис. 2. Профили температуры поверхности ОЦР в двух плоскостях:

А-А — нормальное распределение температуры;
Б-Б — распределение температуры с отклонением от нормы

Сравнительные измерения температуры бесконтактным ИК-методом и с помощью тарированных хромель-копелевых (ХК) термопар были проведены также на боковой наружной поверхности корпуса ОПН. В качестве регистрирующего ИК-прибора служил портативный инфракрасный пирометр типа

ПП-1304, разработанный и производимый в ВЭИ [3]. При разработке этого прибора была поставлена задача создать простой, недорогой и компактный пирометр для широкого применения в энергетике и промышленности.

Установлено, что абсолютная погрешность измерений температуры данным пирометром при температуре поверхности корпуса около 100 °С не превышает ±3 °С, а относительная погрешность ±3 %.

И, наконец, основные измерения температуры поверхности таблетки ОЦР проведены с помощью тепловизора АГЕМА-782 и контролировались тремя ХК-термопарами, предварительно тарированными вместе с термопарными проводами длиной около 1 м и микроамперметрами, что позволяло работать на высоком потенциале. Измерения температур проведены как в стационарном, так и в импульсном режиме нагрузки при значениях тока и напряжения, характерных для работы ОЦР в столбах ОПН.

Принципиальная схема опытной установки показана на рис. 3. Таблетка ОЦР диаметром 60 мм и толщиной 9 мм зажата в вертикальном положении между двумя стягивающими пластинами из стеклотекстолита. В передней стягивающей пластине по центру круга ОЦР имеется сквозное отверстие диаметром 10 мм. Черной нитроэмалью на передней поверхности ОЦР нанесены точки «а» (в центре таблетки) и «б» (по периферии). Вокруг точки «а» между таблеткой ОЦР и прижимными пластинами зажаты три ХК-термопары с диаметром проводов 0,2 мм.

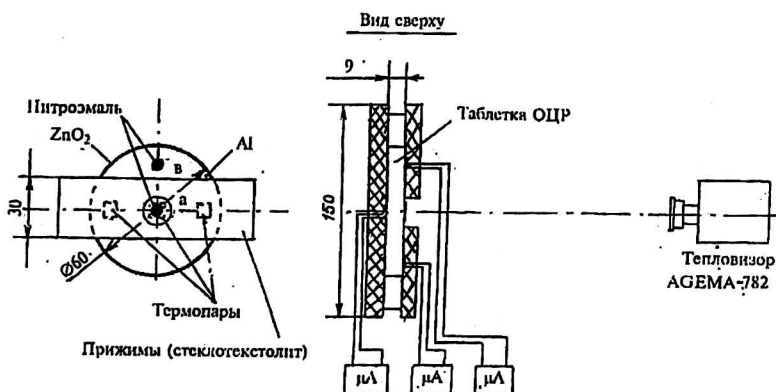


Рис. 3. Схема измерений температуры ОЦР с помощью тепловизора АГЕМА-782 и хромель-копелевых термопар с микроамперметрами

Проводились опыты:

с нагрузкой постоянным током при напряжении на таблетке около 1 кВ и токах 1 — 10 мА;

при импульсной нагрузке после установившегося нагружения постоянным током 1,5 мА в виде серии из 20 импульсов длительностью до 250 мкс при токе в импульсе около 3 кА и напряжении на таблетке 1,78 кВ. Длительность бестоковой паузы между последовательными импульсами 60 с.

По измеренным значениям напряжения, тока и температуры установлено, что сопротивление ОЦР изменяется в зависимости от температуры согласно соотношению $R(\text{кОм}) = 1,4354 \cdot 10^5 t_{\text{ОЦР}}^{-1,584}$. При этом зависимость сопротивления от тока близка к обратно пропорциональной, т. е. $R(\text{кОм}) \cong 1000 / I(\text{мА})$. Поэтому и температура ОЦР изменяется почти пропорционально току (при приблизительно постоянном тепловом сопротивлении R_T), что можно видеть из рис. 4.

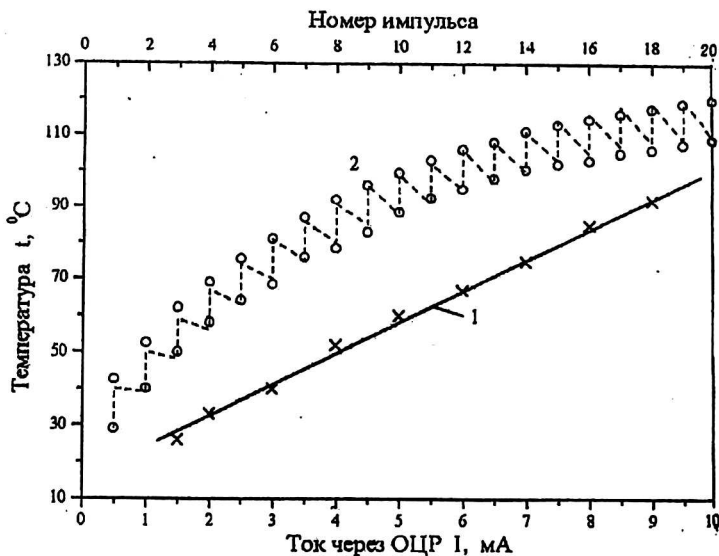


Рис. 4. Нагрев таблетки ОЦР постоянным и импульсным током:
1 — постоянный ток; 2 — импульсный ток с амплитудой 3 кА и напряжением 1,78 кВ;
o — измерение тепловизором AGEMA-782; - - - — теоретический расчет

При средней температуре таблетки в процессе измерений в режиме импульсной нагрузки 71 °С и температуре окружающего воздуха 19 °С среднее превышение температуры составляло $\nu = 52$ °С и средний коэффициент теплоотдачи путем естественной конвекции и излучения $\alpha = 4,59^{1/4} = 4,5 \cdot 52^{1/4} = 12$, Вт/(м²·°С).

Перед импульсным режимом нагрузки ОЦР находился в установившемся режиме с током $I = 1,5$ мА. При этом, согласно рис. 4, температура таблетки составляла $t_0 = 29$ °С, а начальное превышение температуры $\vartheta_0 = 10$ °С, чему соответствует коэффициент теплоотдачи $\alpha_0 = 4,5 \cdot 10^{1/4} = 8$ Вт/(м²·°С).

Эффективная площадь поверхности теплоотдачи ОЦР с учетом медных токоподводов равна $F = 0,0185$ м². Тогда тепловая проводимость теплоотдачи в начале импульсного режима нагрузки $G_0 = \alpha_0 F = 8 \times 0,0185 = 0,148$ Вт/°С. При этом расчетные потери таблетки составят $P = UI = 1 \times 1,5 = 1,5$ Вт, а расчетное превышение температуры таблетки над воздухом $\vartheta_0 = P/G_0 = 1,5/0,148 \approx 10$ °С.

Следовательно, расчетная температура (°С) таблетки перед началом импульсного режима $t_0 = t_{oc} + \vartheta_0 = 19 + 10 = 29$ °С, что совпадает с измеренным значением.

Для расчета изменения температуры ОЦР при импульсном режиме нагрузки, когда длительность импульса $\tau_{имп}$ на несколько порядков короче длительности паузы между импульсами $\tau_{охл}$, как это было при импульсном режиме нагрузки ОЦР в опытах $\tau_{имп} = 250$ мкс, $\tau_{охл} = 60$ с, использована теория переходного теплового режима сплошного тела с однородной по объему температурой при импульсном тепловыделении и конвективном охлаждении в промежутках времени между импульсами. Согласно этой теории

адиабатическое повышение температуры таблетки ОЦР после каждого импульса составляет

$$\Delta t_{\text{имп}} = Q / Mc_p,$$

где Q — полная энергия потерь, рассеиваемая в импульсе;
 Mc_p — полная тепловая емкость таблетки ОЦР.

Превышение температуры после i -го цикла импульсного нагрева над начальной температурой ОЦР до 1-го импульса составляет

$$\vartheta_i^* = \Delta t_{\text{имп}} \frac{1 - \exp\left(\frac{-i\tau_{\text{охл}}}{T}\right)}{1 - \exp\left(\frac{-\tau_{\text{охл}}}{T}\right)}, \quad (1)$$

где $T = \frac{Mc_p}{\alpha F}$ — тепловая постоянная времени;

α — КТО от таблетки путем естественной конвекции и излучения;
 F, M — площадь поверхности и масса таблетки, соответственно;
 c_p — удельная теплоемкость таблетки.

Превышение температуры после паузы в i -м цикле

$$\vartheta_i = \vartheta_i^* \exp\left(\frac{-\tau_{\text{охл}}}{T}\right). \quad (2)$$

Исследуемая таблетка ОЦР имела диаметр $D_1 = 60$ мм и толщину $l_1 = 9$ мм. Объем таблетки $V_1 = \pi \cdot 60^2 \cdot 9 / 4 = 25446,9 \text{ мм}^3 = 25,4469 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$. Масса таблетки $M_1 = \rho_1 V_1 = 5553 \times 25,4469 \cdot 10^{-6} = 0,1413$ кг.

Полная тепловая емкость таблетки $C_1 = M_1 c_{p1} = 0,1413 \times 500 = 70,65$ Дж/°С.

При проведении экспериментов токоподводы и головки термодпар прижились к таблетке стягивающими планками из стеклопластика. Прилегающая к таблетке часть этих планок оказывает существенное влияние на полную тепловую емкость системы и ее тепловую проводимость теплоотдачи. Объем прилегающих к таблетке частей стягивающих планок $V_{\text{пл}} = 2 l_{\text{пл1}} l_{\text{пл2}} l_{\text{пл3}} = 2 \times 53,6 \times 8 \times 30 = 25760 \text{ мм}^3 = 25,76 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$. Масса прилегающих к таблетке частей стягивающих планок $M_{\text{пл}} = \rho_{\text{пл}} V_{\text{пл}} = 1600 \times 25,76 \cdot 10^{-6} = 0,0412$ кг.

Полная тепловая емкость прилегающих к таблетке частей стягивающих планок:

$$C_{\text{пл}} = M_{\text{пл}} c_{\text{пл}} = 0,0412 \times 1250 = 51,52 \text{ Дж/}^\circ\text{С}.$$

Полная тепловая емкость системы таблетка ОЦР — стягивающие планки $C = C_1 + C_{\text{пл}} = 70,65 + 51,52 = 122,17$ Дж/°С.

Энергия, рассеиваемая в течение одного импульса длительностью $\tau_{\text{имп}} = 250$ мкс;

$$E_{\text{имп}} = IU\tau_{\text{имп}} = 3,02 \cdot 10^3 \cdot 1,78 \cdot 10^3 \cdot 250 = 1343,9 \text{ Дж}.$$

Адиабатическое повышение температуры в импульсе:

$$\Delta t_{\text{имп}} = E_{\text{имп}} / C = 1343,9 / 122,17 = 11 \text{ }^\circ\text{С}.$$

Площадь поверхности теплоотдачи таблетки:

$$F_{\text{табл}} = \pi D_1 (D_1/2 + l_1) = 3,14 \times 60 \times 39 = 7351,3 \text{ мм}^2 = 7351 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

С учетом поверхности медных токоподводов эффективная площадь поверхности теплоотдачи таблетки увеличивается в 2,5 раза и составляет $F' = 0,0185 \text{ м}^2$. Коэффициент теплоотдачи путем естественной конвекции и излучения принимаем равным $\alpha = 12 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{}^\circ\text{С)}$. Тогда эффективная тепловая проводимость системы $G = \alpha F' = 12 \times 0,0185 = 0,222 \text{ Вт/}^\circ\text{С}$.

Тепловая постоянная времени системы $T = C/G = 122,17 / 0,222 = 550 \text{ с}$.

В качестве начальной температуры ОЦР перед серией импульсов принимается $t_0 = 29\text{ }^\circ\text{C}$ — равновесная температура после режима нагрузки ОЦР постоянным током.

Результаты расчета температур по формулам (1) и (2) после каждого импульса и каждой паузы между ними в серии из 20 импульсов см. на рис. 4. Здесь же представлены результаты экспериментального определения этих температур с помощью тепловизора. Можно видеть, что результаты расчета хорошо согласуются с данными измерений — максимальное абсолютное расхождение не превышает $2\text{ }^\circ\text{C}$.

Кроме исследований на одной таблетке ОЦР, нами были проведены тепловизионные измерения 20 образцов ОЦР типа МНР-58 в целях использования в дальнейшем полученных результатов для совершенствования технологии производства и отбраковки ОЦР при комплектации ОПН.

Экспериментальный стенд был аналогичен показанному на рис. 1, но вместо однострочного тепловизора использовался английский тепловизор типа 8010 (фирмы Thermal Imaging Ltd) с чувствительностью $0,2\text{ }^\circ\text{C}$ при числе строк около 100 и $1\text{ }^\circ\text{C}$ — при числе строк около 250. Данный тепловизор имеет стандартный черно-белый телевизионный выход: видеосигнал с замешанной синхросмесью. Это позволило фиксировать результаты на видеомagneитофоне и обрабатывать на компьютере с помощью легко доступных в Интернете программ.

В данном эксперименте было решено не покрывать образцы зачерняющим слоем, так как предварительно измеренное пирометром ПП1304 значение $\varepsilon = 0,4$ можно считать удовлетворительным.

За 5—10 с до импульса тока ($550\div 600\text{ A}$, 2 мс) тепловизор и видеомagneитофон включались, и производилась запись нескольких десятков кадров после импульса. Интегральная температура поверхности ОЦР измерялась пирометром ПП1304 (таблица).

Параметры исследования ОЦР типа МНР-58 из партии № 208

Номер образца	U^* , кВ	I^* , А	P^* , кВт	t , $^\circ\text{C}$	I^{**} , А	t , $^\circ\text{C}$	I^{***} , А	t , $^\circ\text{C}$
1	3,34	590	1970	92	890	79	3×570	135
2	3,38	560	1890	79	600	90	3×590	170
3	3,45	560	1930	86	590	84	—	165
4	3,35	580	1643	86	590	86	3×580	170
5	3,49	560	1950	79	580	80	3×560	160
6	3,44	560	1930	79	570	90	3×560	190
7	3,43	570	1980	95	570	86	—	—
8	3,39	580	1970	79	590	86	—	—
9	3,44	580	2000	76	580	79	—	—
10	3,43	560	1920	80	560	79	—	—

* Одиночный импульс, лицевая сторона ОЦР.

** То же, обратная сторона. U — не фиксировалось.

*** Трехкратный импульс, лицевая сторона ОЦР. U — не фиксировалось.

Для партии № 201 измерение температуры пирометром не проводилось.

Для первой партии (10 шт.) измерения проводились с одной торцевой стороны; для второй партии (также 10 шт.) измерения проводились с обеих сторон, кроме того, на образцы с 1 по 6 подавалась серия из трех импульсов с интервалом $\approx 5\text{ с}$.

С видеомagneитофона информация подавалась на компьютер и оцифровывалась с помощью недорогой, доступной платы видеозахвата фирмы Aver Media, формат записи составил 25 кадров в секунду, разрешение оцифрован-

ного кадра 384x288, скорость передачи данных 300 байт/с. Покадровая обработка изображения проводилась с помощью программ Ulead Media Studio Pro 5.0 Trial, а также Adobe Photoshop 5.5.

На рис. 5, *а* и *б* показаны полученные термограммы ОЦР непосредственно после импульса (1-й тепловизионный кадр, 40 мс) и через 240 мс (6-й кадр). Контактный электрод на тепловом изображении виден как наклонная темная полоса. Максимальная локальная температура на рис. 5, *а* составляла $100 \div 110$ °С, средняя температура образца на рис. 5, *б* — $80 \div 90$ °С.

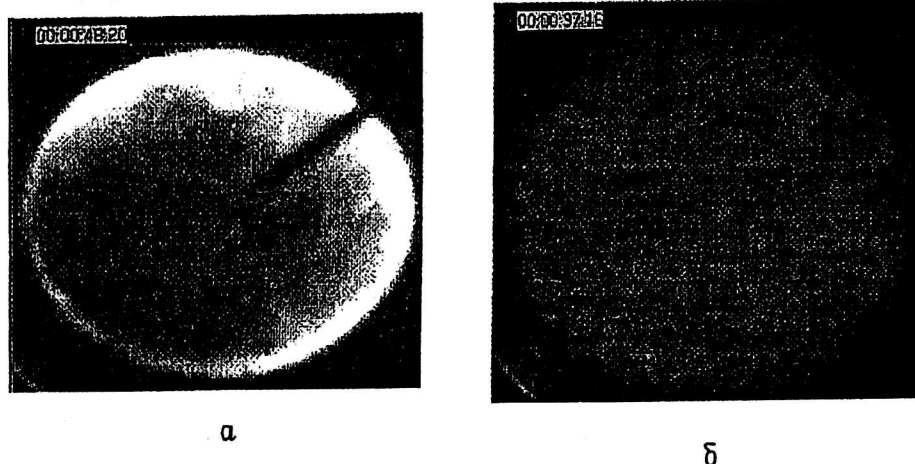


Рис. 5. Тепловое изображение ОЦР после импульса тока:
а — через 40 мс; *б* — через 240 мс

Как видно из таблицы, температуры дисков на 80—90 % соответствуют сообщенной им энергии, что подтверждает точность пирометра ПП1304. Также можно отметить хорошее совпадение температур ОЦР, измеренной тепловизором АГЕМА-782, и температур в таблице (с учетом разных условий проведения измерений: напряжения, токи, длительность импульсов, характер теплоотвода были различными).

Представляется интересным, что на большинстве образцов нагрев локализуется в виде кольца на периферии. Это совпадает с результатом, полученным в [8], где данный эффект объясняется увеличением размера зерен от центра к периферии из-за особенностей трения в пресс-форме при изготовлении ОЦР.

Заключение

Измерения температуры поверхности оксидно-цинковых резисторов с помощью бесконтактных методов (тепловизора, ИК-сканера, ИК-пирометра) позволяют определить как распределение температуры и электропроводности ОЦР по поперечному сечению таблетки, так и тепловой режим таблетки в стационарном и импульсном режимах нагрузки. Погрешность таких измерений в зависимости от типа прибора составляет $1 \div 3$ °С, относительная погрешность $1 \div 3$ %.

Данные измерений температур ОЦР хорошо согласуются с результатами теплового расчета как в стационарном, так и в импульсном режиме нагрузки.

С помощью покадровой обработки видеоизображения исследованы 20 образцов ОЦР типа МНР-58. Выявлена кольцеобразная локализация нагрева на периферии образцов.

Л и т е р а т у р а

1. РД 34.45-51.300—97. Объем и нормы испытаний электрооборудования (изд. 6).
2. РД 153-34.0-20.363—99. Основные положения методики инфракрасной диагностики электрооборудования и ВЛ.
3. *Дулькин И. Н.* Исследование термостабильности ограничителей перенапряжений. Перспективные ограничители перенапряжений для систем сверхвысокого напряжения//Сб. науч. тр./ВЭИ. — М., 1987. С. 40—52.
4. *Алмазов В. А.* и др. Применение ИК-методов для измерения температуры поверхности оксидно-цинковых резисторов при постоянной и импульсной нагрузке//Известия РАЕН. Сер. Тепловидение, 2000. Вып. 13. С. 60—66.
5. *Карлсен Г. Г., Овчаров И. В.* К расчету сканирующей системы для измерения тепловых полей высоковольтного оборудования//Там же. С. 54—59.
6. *Zander W.* Alterungsmechanismen von ZnO — Ableitermaterial bei Stossbelastung//Etz Archiv, 1990. Bd 12. H.9. S. 283—289.
7. *Овчаров И. В.* Разработка и применение тепловизоров и пирометров ВЭИ. — ТЕМП: Сб. тр. Междунар. конф. "Прикладная оптика-98". —С.-Пб., 1998.
8. *Wang H., Bartkowiak M., Modine F., Dinwiddie R., Boatner L. and Mahan G.* Nonuniform Heating in Zinc Oxide Varistors Studied by Infrared Imaging and Computer Simulation//J. Am. Ceram. Soc. 1998. № 81 (8). P. 2013—2022.

Авторы благодарят Л. А. Люцареву, В. К. Пугачева, В. В. Александрова за консультации и помощь в работе.

Examination of the thermal characteristics of oxide-zinc resistors in pulsed conditions with the help of thermal-imaging devices

*O. I. Abramov, V. A. Almazov, N. N. Gorbachevskaya,
I. N. Dulkin, V. I. Zavadskaya, G. G. Lavrent'ev, D. I. Ovcharov,
I. V. Ovcharov, E. K. Ornat*

The Lenin's All-Russian Electrotechnical Institute, Moscow, Russia

The thermal characteristics of oxide-zinc resistors in pulsed conditions have been explored with the help of three types of the IR imagers and with usage of the different approaches. The obtained experimental surge characteristics are compared to results of the analytical examination. The totals of operation can be used at perfecting over-voltage suppressers.