

Эксплуатация электрооборудования

А.Н. Козлов

*Измерение температуры
электрического оборудования*

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Температура оборудования - это первое, на что обращает внимание дежурный персонал в процессе обслуживания. К измерению температуры оборудования в энергетике предъявляются **два** основных требования: **точность и надежность**.

В большинстве своем точность измерения температуры оборудования находится в пределах **$\pm 1 \div 1,5$ °С**, кроме измерения температуры водоохлаждаемых обмоток, где точность лежит в пределах **$\pm 0,5$ °С**. При различных испытаниях и исследованиях температура измеряется с точностью до **$\pm 0,1$ °С**.

Требования к надежности измерения температуры оборудования достаточно жесткие, т.к. от термоконтроля зачастую зависит надежность работы, например подшипников и подпятников, изоляции обмоток и т.п. Система термоконтроля должна быть:

- долговечна,
- допускать простую калибровку в любое время (проверку «нуля» и фиксированной точки температуры),
- не подвергаться влиянию внешних факторов - вибрации, сильных электрических и магнитных полей.

Разработано несколько методов термоконтроля, основными из которых являются:

- метод терморезистора (прямой и косвенный),
- метод термопары,
- инфракрасный метод,
- методы, использующие изменение физического или химического состояния вещества при изменении его температуры.

Каждый из перечисленных способов имеет свои преимущества и недостатки.

Метод терморезистора

Используется зависимость сопротивления проводника от его температуры:

$$R = f(\vartheta)$$

В большинстве случаев сопротивление увеличивается с ростом температуры. Эта зависимость у меди линейна в пределах от -50°C до $+200^{\circ}\text{C}$, у железа и вольфрама она в основном нелинейна. Сопротивление полупроводников, а также материалов типа угля, вилита и электролитов уменьшается при увеличении температуры, их температурные характеристики нелинейны.

Сопротивление проводника с линейной характеристикой:

$$R = R_0 (1 + \alpha \vartheta)$$

R - сопротивление проводника, (Ом) при температуре ϑ

R_0 - сопротивление проводника, (Ом) при температуре 0°C

ϑ - температура проводника, ($^{\circ}\text{C}$)

α - температурный коэффициент сопротивления (ТКС) проводника.

Сопротивление R_2 проводника при температуре ϑ_2 можно вычислить, зная его сопротивление R_1 при температуре ϑ_1

$$R_2 = R_1 \frac{1 + \alpha \vartheta_2}{1 + \alpha \vartheta_1}$$

У меди $\alpha \approx 0,0043$, следовательно

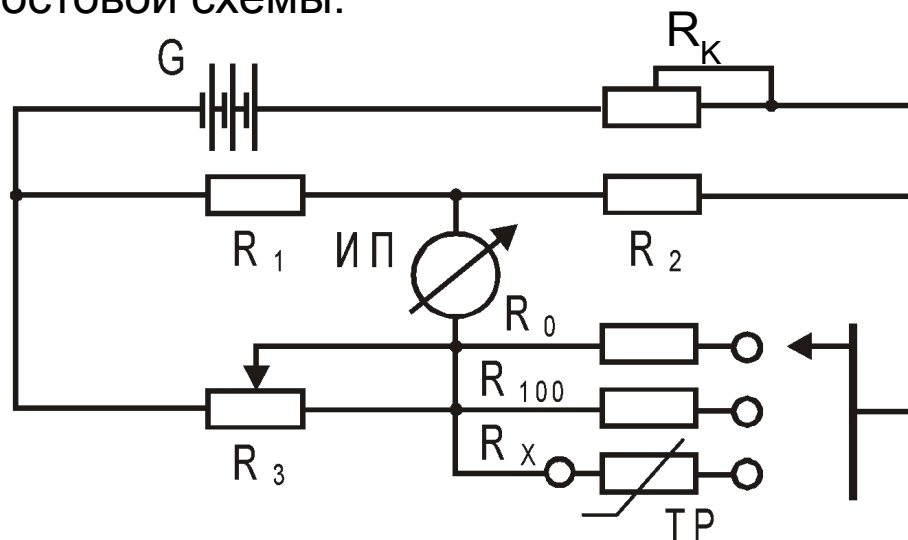
$$R_2 = R_1 \frac{235 + \vartheta_2}{235 + \vartheta_1}$$

Температура ϑ_2 медного проводника по его сопротивлению R_2

$$\vartheta_2 = \frac{R_2}{R_1} (235 + \vartheta_1) - 235$$

Все сопротивления обмоток электрических машин, величина которых указывается в паспортах и формулярах машин, пересчитываются на базовую температуру 15°C .

Измерения по методу терморезистора (ТР) удобнее всего производить с использованием мостовой схемы:



При включении R_0 мост балансируется посредством R_3 на «ноль», при включении R_{100} измерительный прибор ИП посредством R_K устанавливается на отметку «100 делений», соответствующую 100°C . Для измерения температуры включается R_X , представляющий собой терморезистор ТР, установленный на объекте.

Прецизионный термометр MicroK



- Лучшие характеристики в своем классе
- Точность: до 0,1 ppm (ppm – одна миллионная часть чего-либо; англ. *parts per million* — частей на миллион)
- Отсутствие нестабильности нуля
- Работает с ПТС, термопарами, термисторами
- Время измерения < 2 сек.
- 3 канала, расширение до 92 каналов
- Сенсорный экран
- Встроенный микрокомпьютер с ОС Windows CE
- RS232, USB интерфейсы

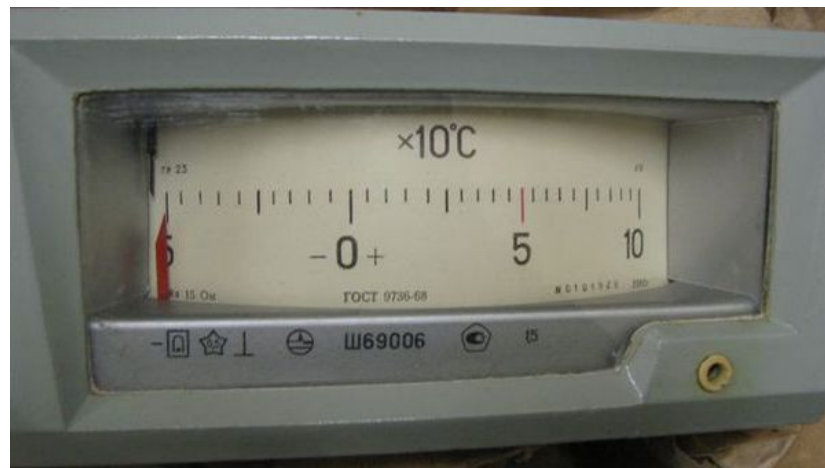
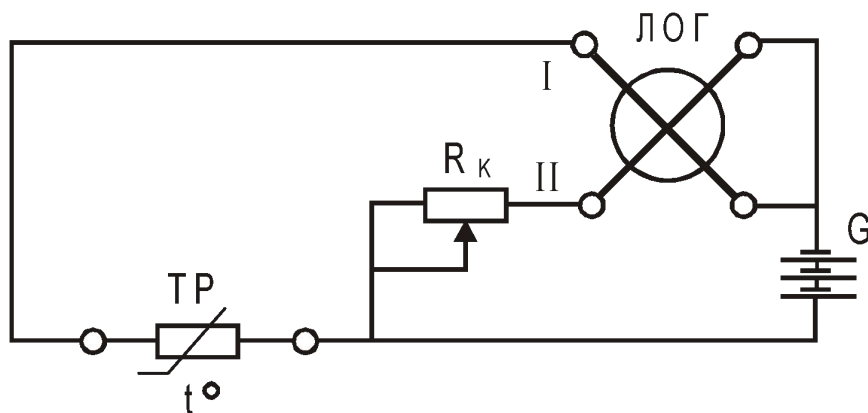
Высокоточный цифровой термометр ТТ1-7+



- Диапазон измерения температуры -200...2315 °C
- Высокая точность измерения для входа Pt100 $\pm 0,01$ C°
- Может работать с отечественным ТС типа ЭТС-100 3 разряда
- Адаптирован к термометрам с сопротивлением 25 и 100 Ом (изменения в соответствии с требованиями МСТ-90 и МЭК-751)
- Исключает нежелательные тепловые ЭДС с изменением направления тока
- 2 измерительных канала с возможностью расширения до 10-ти
- Индикация измеряемой температуры в °C, °F, K
- Встроенный регистратор данных сохраняет до 4000 измерений
- Портативный - 10 часов использования от встроенного аккумулятора

Схема моста позволяет измерять температуру с погрешностью, определяемой в основном классом ИП. При использовании ИП кл. 0,2 точность измерения температуры не хуже $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$.

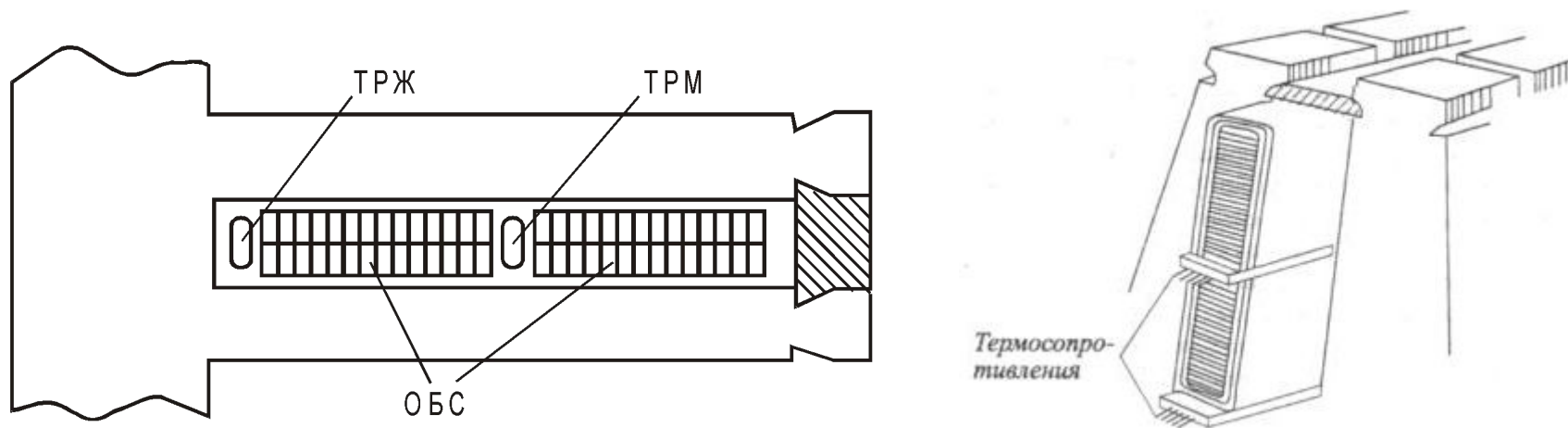
Логометрическая схема измерения температуры



Логометр ЛОГ сравнивает два тока, протекающих по обмоткам I и II. В обмотке I протекает ток, величина которого зависит от сопротивления ТР, а следовательно, от измеряемой температуры, а ток в обмотке II регулируется потенциометром R_k

Логометрическая схема проще, но менее точна, т.к. ЛОГ имеют невысокий класс точности, обеспечивающий измерение температуры с точностью не лучше $\pm 2^{\circ}\text{C}$. Эта схема широко применяется для штатного термоконтроля за обмотками, подшипниками и подпятниками генераторов, за температурой охлаждающей воды, воздуха и масла в трансформаторах.

Применение метода терморезистора

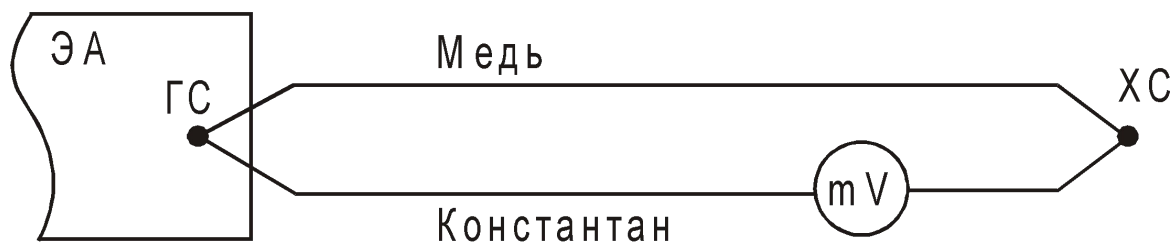


Разрез по пазу статора генератора с терморезисторами: TPЖ измеряет температуру железа $\vartheta_{ж}$, TPМ измеряет температуру меди $\vartheta_{м}$, ОБС - обмотка статора

Для измерения температуры обмотки и железа статора электрической машины используют ТР из тонкой медной проволоки диаметром 0,1 мм, намотанной на тонкую пластинку из изоляционного материала, защищенный внешней изоляцией. ТР, измеряющий температуру обмотки (меди), закладывается в пазу статора между секциями обмотки TPМ. ТР, измеряющий температуру железа статора, закладывается на дно паза (TPЖ). Необходимо отметить, что TPМ практически измеряет температуру **на поверхности изоляции обмотки**, а не температуру собственно меди обмотки, которая на 1-2°C выше за счет температурного перепада на изоляции. Но эта погрешность неизбежна, т.к. невозможно укрепить TPМ непосредственно на обмотке, находящейся под высоким напряжением. Эта погрешность учитывается во всех нормах и ГОСТах.

Метод термопары

Метод является достаточно точным и универсальным, основанным на известном явлении возникновения термо-ЭДС при нагревании спая двух разнородных металлов, Термо-ЭДС спая медь-константан равна приблизительно $0,04 \text{ В/}^\circ\text{С}$. Точное значение термо-ЭДС зависит от материала спая и его технологии. Практически все термопары перед использованием калибруются. Схема измерения температуры:



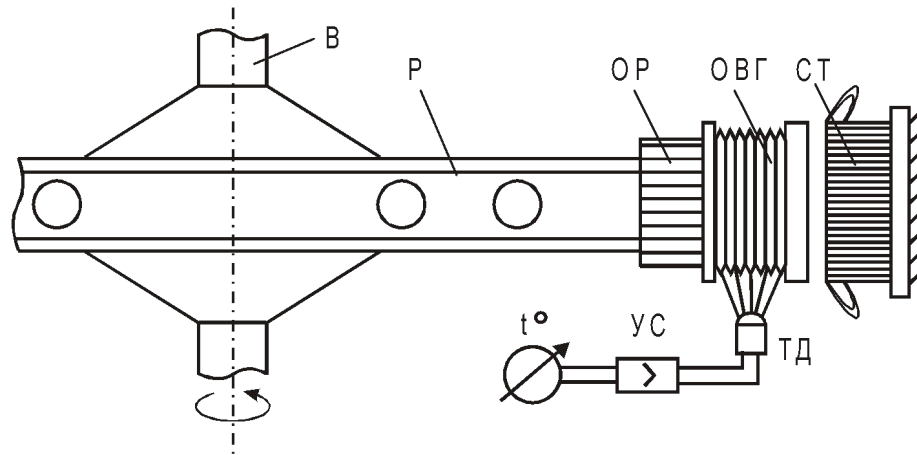
«Горячий спай» ГС находится на объекте измерения - электрическом аппарате ЭА, температура «холодного спая» ХС должна быть точно известна.

Милливольтметр измеряет разность ЭДС ГС и ХС.

Метод термопары обладает одним **недостатком** - малой ЭДС при невысоких температурах. Поэтому его редко применяют для штатного измерения температуры электрических аппаратов, чаще - для точных измерений при специальных испытаниях и исследованиях. Более широко он применяется для измерений в теплотехнической части электростанции, где температуры достигают сотен градусов и термо-ЭДС достаточно велика. 10

Бесконтактное измерение температуры

Применяется в основном в тех случаях, когда перечисленные классические способы неприменимы. Например, при измерении сопротивления обмотки ротора генератора с выпрямительной системой возбуждения **на ходу** возникают заметные трудности связанные с наличием на обмотке возбуждения большой переменной составляющей напряжения. Схема бесконтактного измерения температуры обмотки полюсов ротора гидрогенератора:



На валу В генератора вращается ротор Р с ободом ротора ОР и обмоткой возбуждения полюсов ОВГ, Под полюсами ротора неподвижно установлен термодатчик ТД, воспринимающий инфракрасное излучение нагретой ОВГ, пропорциональное температуре ОВГ. Усиленный в усилителе УС сигнал от ТД поступает на измерительный градуированный прибор. Система относительно проста и надежна.

Инфракрасный термометр ST350



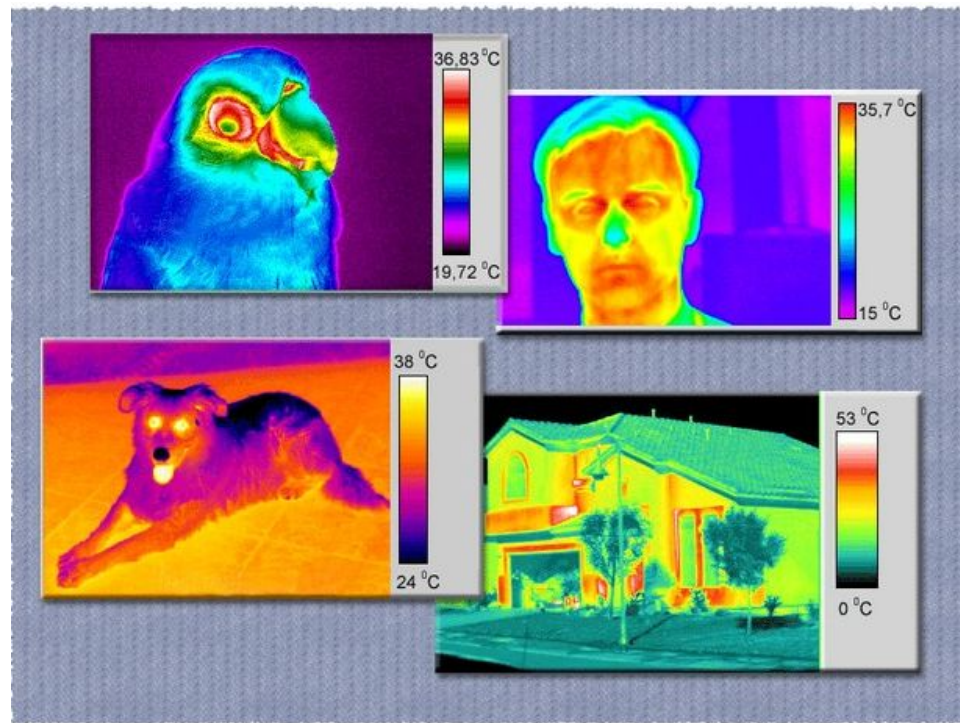
Инфракрасный термометр Sanrometer ST350 предназначен для бесконтактного контроля температуры. Подобные приборы для бесконтактного измерения температуры также называют пирометрами. Используется для измерения температуры продуктов питания, безопасного исследования огня, двигателей, в производстве пластмасс и т.п.

Диапазон измерений: -25°C - $+400^{\circ}\text{C}$

Разрешение: 1°C

Точность измерений температуры $\pm(2\%+1^{\circ}\text{C})$

Тепловизор

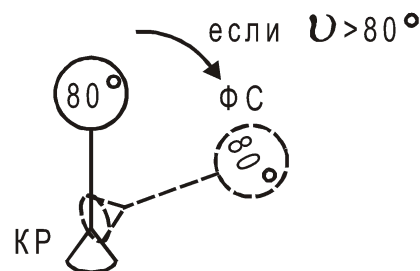
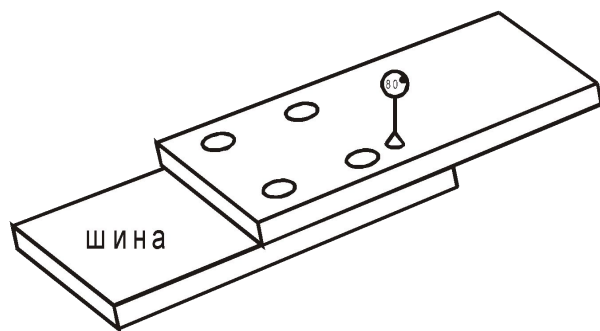


Устройство для наблюдения за распределением температуры исследуемой поверхности. Распределение температуры отображается на дисплее (или в памяти) тепловизора как цветное поле, где определённой температуре соответствует определённый цвет. Как правило, на дисплее отображается диапазон температуры видимой в объектив поверхности. Типовое разрешение современных тепловизоров — $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Различают наблюдательные и измерительные тепловизоры. Первые просто делают изображение в инфракрасных лучах видимым в той или иной цветовой шкале. Измерительные тепловизоры, кроме того, присваивают значению цифрового сигнала каждого пиксела соответствующую ему температуру, в результате чего получается картина распределения температур.

Измерение температуры методом измерения физического состояния измерителя

Используется для разовых измерений или измерений в дежурном режиме для сигнализации о превышении допустимой температуры.

Легкоплавкие припои с четким переходом из твердой в жидкую фазу при определенной температуре используются для пайки сигнальных флажков-семафоров (см. рис.). При достижении заданной, опасной для оборудования, температуры припой расплавляется и флажок падает. При очередном обходе оборудования дежурный персонал зафиксирует недопустимый нагрев элемента оборудования.



Из легкоплавких материалов изготавливают «свечи», по оплавлению которых также можно определить температуру оборудования в труднодоступных местах.

Термокраски также используются для контроля за температурой в недоступных местах. Термокраска - термореактивное вещество, резко изменяющее свой цвет при достижении заданной температуры. Термокраска наносится на изучаемый элемент оборудования, например на ротор машины. После проведения эксперимента машину останавливают и наблюдают цвет термокраски: если он изменился, машина нагревалась выше пороговой температуры термокраски. Обычно на объект измерения наносят несколько красок с различными пороговыми температурами. Если были нанесены термокраски с температурами срабатывания 70, 90 и 100°С и после опыта термокраски на 70 и 90°С изменили свой цвет, а 100-градусная не изменила, то это значит, что объект нагревался в среднем до 95°С (более 90° и менее 100°С).

| Марка краски | Температура перехода °C | Исходный цвет | Цвет после нагрева |
|--------------|----------------------------|-----------------------|--------------------------|
| 1a | 45 | <u>светло-розовый</u> | <u>голубой</u> |
| 31 | 70 | <u>розовый</u> | <u>зелёный</u> |
| 32 | 85 | <u>светло-розовый</u> | <u>светло-синий</u> |
| 13 | 90 | <u>светло-зелёный</u> | <u>светло-коричневый</u> |
| 50 | 110 | <u>светло-розовый</u> | <u>светло-фиолетовый</u> |
| 4 | 120 | <u>светло-зелёный</u> | <u>фиолетовый</u> |
| 30 | 130 | <u>жёлтый</u> | <u>оранжевый</u> |
| 5 | 150 | <u>фиолетовый</u> | <u>чёрный</u> |
| 6 | 180 | <u>светло-зелёный</u> | <u>чёрный</u> |
| 230 | 200 | <u>зелёный</u> | <u>беж</u> |
| 8 | 240 | <u>светло-зелёный</u> | <u>коричневый</u> |
| 240 | 250 | <u>бирюзовый</u> | <u>белый</u> |
| 10 | 280 | <u>сиреневый</u> | <u>чёрно-синий</u> |
| 12 | 360 | <u>синий</u> | <u>беж</u> |
| 66 | 410 | <u>белый</u> | <u>коричневый</u> |
| 470 | 445 | <u>сине-зелёный</u> | <u>светло-серый</u> |
| 15 | 470 | <u>оранжевый</u> | <u>серый</u> |
| 480 | 485 | <u>голубой</u> | <u>светло-серый</u> |
| 490 | 510 | <u>сине-зелёный</u> | <u>оранжевый</u> |
| 528 | 555 | <u>чёрный</u> | <u>тёмно-зелёный</u> |
| 14 | 570 | <u>розовый</u> | <u>белый через беж</u> |
| 7 | 700 | <u>бледно-зелёный</u> | <u>ярко-зелёный</u> |
| 100 | 800 | <u>сиреневый</u> | <u>светло-фиолетовый</u> |



Поверхность, покрытая краской ECLIPSE, при температуре свыше 20°C за считанные секунды меняет свой основной черный цвет на белый. Предлагается в двух вариантах: черно-белом и сине-белом. При добавлении красителей CANDY, можно получить невероятно яркие цветовые решения: черно-голубой, черно-салатовый, черно-красный, желто-зеленый и тд.