

# Контроль. Диагностика

TESTING. DIAGNOSTICS



9<sup>(123)</sup> 2008  
сентябрь



**ЗАО "НИИИИ МНПО "СПЕКТР"**  
Отдел оптических и телевизионных систем диагностики

## МПМ-2У

**Металлографические  
Портативные  
Микроскопы**

Полная линия решений оперативной металлографии



МПМ-2У-СП



МПМ-2У-КС



МПМ-2У

**Модульная конструкция** — легкость модификации для работы в труднодоступных местах, на выпуклых и вогнутых поверхностях, трубах малого диаметра (от 20 мм) и др.

**Двухкоординатный столик** позволяет сканировать поверхность по двум координатам (съемка по ГОСТ 5639)

**Увеличение** — 100х, 200х, 400х; опционально — 500х, 800х

**Габариты** — 70x70x120 мм (МПМ-2У, без адаптера и фотокамеры)

**Масса** — не более 1,2 кг

**Питание**  
от батарей или сети 220 В / 50 Гц

119048, Москва, ул. Усачёва, 35, стр.1, оф. 513-516а

Тел.: 8(499) 245 57 68, 245 59 18. Тел./факс: 8(499) 245 53 65. [Http://www.nio7spectr.ru](http://www.nio7spectr.ru). E-mail: nio7@newmail.ru



## Тепловой контроль технического состояния силовых электрических кабелей и электропроводки

Несмотря на тенденцию снижения общего числа возгораний на всей территории Российской Федерации с 2003 по 2006 г., обстановка по-прежнему остается достаточно тяжелой [1]. В 2006 г. было зарегистрировано 72,3 % возгораний в жилом секторе и 27,7 % – в промышленном. При этом доля материального ущерба от возгораний составляет соответственно 44,6 и 55,4 %.

Анализ показал, что наиболее распространенной причиной возгораний (каждого пятого возгорания – 19,2 % с долей материального ущерба по стране 31,5 %) является нарушение правил устройства и эксплуатации электрооборудования. При этом электрокабели и электропроводка являются наиболее пожароопасными элементами электроустановок. На их долю приходится примерно 40 % возгораний, связанных с электрооборудованием и электроустройствами.

Исследования выявили две основные причины сложившегося положения.

1. Значительная часть парка электрооборудования выработала свой нормативный срок службы или находится на границе предельного значения. Ремонт и замена устаревшего парка происходят крайне медленно.

2. Вторая причина обусловлена нехваткой квалифицированных рабочих кадров обслуживающего персонала, который постоянно задействован на устранении возникающих аварийных ситуаций и отказов электрооборудования.

Поэтому вопросы своевременного предотвращения аварийных ситуаций, повышения надежности функционирования и поддержания электросиловых кабелей и электропроводки в исправном состоянии в настоящее время весьма актуальны.

Одним из эффективных способов решения указанных проблем является оперативная диагностика, по-



звляющая выявлять дефекты и повреждения, влияющие на безопасность эксплуатации исследуемых объектов, на ранних стадиях их развития и принимать соответствующие меры к их оперативному устранению.

При протекании электрического тока по токопроводящим жилам происходит выделение теплоты, величина которой зависит от протекающего тока, времени работы, физических и геометрических параметров конструкции электропроводки, наличия дефектов и повреждений и т.п. Поэтому для диагностики электропроводки целесообразно использовать тепловой неразрушающий контроль [2], основанный на дистанционной регистрации и специальном анализе температурных полей и имеющий ряд преимуществ перед традиционными методами диагностики, используемыми в настоящее время:

- высокую производительность контроля при практически любой величине разрешения вследствие дистанционности контроля и применения современных средств тепловизионной техники, обеспечивающих регистрацию миллионов элементов в секунду;
- возможность реализации с помощью многофункциональной мобильной аппаратуры;
- бесконтактность процесса контроля (возможность контроля теплового состояния электропроводок без снятия напряжения);
- выявление дефектов и повреждений на ранних стадиях их развития;
- прогнозирование процессов их образования и протекания;
- высокую информативность, в том числе обработанных данных. Сведения, полученные в ходе теплового контроля, способствуют сокращению затрат на техническое обслуживание за счет прогнозирования сроков и объемов ремонтных работ.

Рассмотрим проблему исследования и разработку метода теплового контроля безопасности эксплуатации электросиловых кабелей, эксплуатирующихся как в условиях атмосферы (открытая проводка), так и заложенных в строительных конструкциях.

В данной статье изложены результаты теоретических и экспериментальных исследований по первой части указанной проблемы: теплового контроля безопасности эксплуатации электросиловых кабелей в условиях атмосферы.

В последующих статьях будут описаны результаты разработки метода теплового контроля электросиловых кабелей, заложенных в строительных конструкциях.

Основной задачей теплового контроля является обнаружение и идентификация дефектов (повреждений) исследуемых объектов, влияющих на безопасность их эксплуатации. Разработка теплового метода

контроля для решения данных задач проводилась на основе методов математического моделирования тепловых процессов в объекте и экспериментальных исследований на объектах с эталонными (искусственными) и реальными дефектами.

Математическому моделированию проблем теплопередачи в электрических кабелях посвящено достаточно большое количество работ, например [4–6].

Они позволяют проводить теоретические исследования процессов теплопередачи в электрических кабелях. Однако применение их на практике затруднительно. Это связано с тем, что, как правило, разработанные модели достаточно сложны, описывают процессы в конкретных типах кабелей с определенным количеством электропроводных жил.

Для создания метода теплового контроля большой номенклатуры электросиловых кабелей необходима математическая модель, количественно описывающая процессы в различных по конструкции кабелях, имеющая достаточную для практики точность описания процессов теплопередачи и простую в применении.

Определим информативные данные для математического моделирования.

Исследования показали, что силовые электрические кабели (одножильные и многожильные) и различные типы электропроводки имеют два основных типа дефектов, влияющих на их работоспособность:

- дефекты изоляции, которые, как правило, выражаются в уменьшении ее эффективной толщины (толщины, приведенной к типовым характеристикам) на определенной площади;
- дефекты электропроводных металлических жил, которые сводятся к уменьшению их поперечного сечения (поперечные трещины, надломы и т.п.). При этом протяженность по длине жилы участка с уменьшенным поперечным сечением жилы практического значения не имеет.

На рис. 1 приведены фотографии дефектов реальных силовых кабелей в условиях их эксплуатации. Белым контуром указана область дефекта изоляции и жилы.

Таким образом, математическая модель должна описывать процесс теплового контроля (обнаружения и идентификации) изменения толщины изоляции и площади поперечного сечения электропроводной жилы на определенной площади поверхности.

Для разработки математической модели согласно сформулированным условиям рассмотрим предположение о возможности преобразования математического моделирования процессов теплового контроля многожильных кабелей к одножильному кабелю.

Температурное состояние кабеля при подаче на него питающего напряжения имеет две стадии: переходную и стадию установившегося режима.



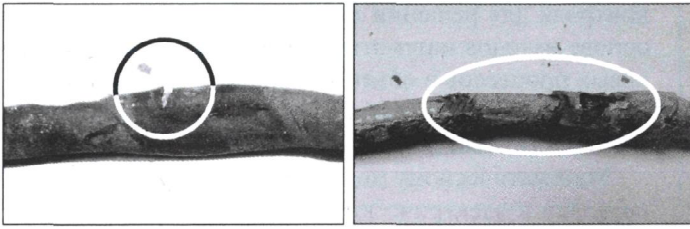


Рис. 1. Дефекты в кабеле и электропроводке

Рассмотрим установившееся тепловое состояние одножильного кабеля (рис. 2).

Двухслойный цилиндр полагается бесконечно длинным, и температура в нем изменяется только вдоль радиальной координаты с началом ( $r = 0$ ) на продольной оси. В первом цилиндре имеется источник энергии (тепла) с объемной плотностью

$$q_v = P/LS = I^2 R/LS = I^2 \rho_v / S^2,$$

где  $I$  — сила тока, протекающего по жиле (проводнику);  $\rho_v$  — удельное объемное электрическое сопротивление материала жилы;  $S$  — площадь поперечного сечения жилы;  $P$  — мощность источника энергии;  $R$  — электрическое сопротивление;  $L$  — протяженность жилы.

Внешняя поверхность второго цилиндра находится в теплообмене (с коэффициентом теплоотдачи  $\alpha_c$ ) с окружающей средой, имеющей температуру  $T_c$ .

Температурное поле такого объекта описывается системой четырех дифференциальных уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d^2 T_1}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT_1}{dr} + \frac{q_v}{\lambda_1} = 0; \\ \frac{d^2 T_2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT_2}{dr} = 0; \end{array} \right. \quad 0 < r < r_2.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda_1 f \frac{dT_1}{dx_1} + \alpha_c u_1 (T_1 - T_c) = q_v f; \\ \lambda_1 f \frac{dT_2}{dx_2} + k u_2 (T_2 - T_c) = q_v f; \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} 0 < x_1 < \alpha_c; \\ 0 < x_2 < \infty. \end{array} \quad (1)$$

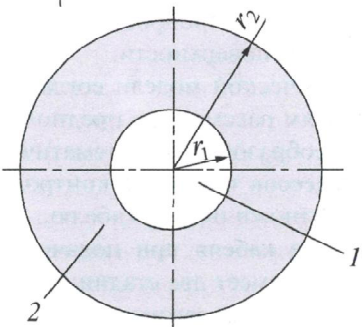


Рис. 2. Схема одножильного кабеля с защитной оболочкой:

1 — электропроводная жила; 2 — защитная оболочка;  $r_1$  — радиус электропроводной жилы;  $r_2$  — радиус одножильного кабеля

Первые два уравнения описывают распространение теплового фронта в радиальном направлении, вторые два — в продольном — в направлении оси  $X$  для учета эффекта растекания тепла вдоль жилы (см. рис. 2).

В уравнениях (1) приняты следующие обозначения:

$f = 2\pi r_1^2$  — площадь поперечного сечения жилы;

$\lambda_1$  — коэффициент теплопроводности жилы;

$\alpha_c u_1 = \frac{2\pi}{1} \frac{1}{\alpha_{c1} r_1}$  — погонная теплоотдающая способность

обнаженного участка кабеля;  $k u_2 = \frac{2\pi}{\frac{1}{\alpha_{c2} r_2} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{r_2}{r_1}}$  —

погонная теплоотдающая способность кабеля, закрытого изоляцией;  $x_1$  и  $x_2$  — координаты.

Проведя несложные математические преобразования и интегрирование системы (1) с учетом граничных и начальных условий, получим зависимости, описывающие распределение температуры вдоль радиальной координаты и вдоль кабеля (направление  $X$ ) в жиле и изоляции кабеля:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_1(r) = -\frac{q_v r^2}{4\lambda_1} + T_c + \frac{q_v r_1}{2} \left( \frac{r_1}{\lambda_2} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{r_1}{\alpha_c r_2} + \frac{r_1}{2\lambda_1} \right), \\ 0 < r < r_1; \\ T_2(r) = T_c + \frac{q_v r_1}{2} \left( \frac{r_1}{\lambda_2} \ln \frac{r_2}{r} + \frac{r_1}{\alpha_c r_2} \right), \quad r_1 < r < r_2. \end{array} \right. \quad (2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} T_1(x_1) = C_1 e^{-m_1 x_1} + C_2 e^{m_1 x_1} + T_c + \frac{q_v f}{\alpha_{c1} u_1}; \\ T_2(x_2) = C_3 e^{-m_2 x_2} + T_c + \frac{q_v f}{k u_2}. \end{array} \right. \quad (3)$$

Здесь

$$m_1 = \sqrt{\frac{\alpha_{c1} u_1}{\lambda_1 f}}; \quad m_2 = \sqrt{\frac{k u_2}{\lambda_1 f}} \quad \text{— параметры, определяющие}$$

скорость растекания температуры;

$$C_1 = C_2 = \frac{q_v f \left( \frac{1}{k u_2} - \frac{1}{\alpha_{c1} u_1} \right)}{(e^{-m_1 \alpha_c} + e^{m_1 \alpha_c}) - \frac{m_1}{m_2} (e^{-m_1 \alpha_c} - e^{m_1 \alpha_c})}; \quad (4)$$

$$C_3 = \frac{m_1}{m_2} (e^{-m_1 \alpha_c} - e^{m_1 \alpha_c}) C_1.$$

При прокладке кабелей в воздушной среде коэффициент теплоотдачи на его наружной поверхности ( $\alpha_c$ ) определяется конвективной и лучистой состав-



ляющими. Величина коэффициента теплоотдачи в этом случае может быть рассчитана по формуле

$$\alpha_c = 0,026 \frac{\lambda_c}{D_2} \left( \frac{v_c D_2}{\nu_c} \right)^{0,8} \text{Pr}_c^{0,33} + \frac{\left( \frac{T_2 + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_c + 273}{100} \right)^4}{T_2 - T_c} + \sigma \varepsilon_2 \quad (5)$$

где  $T_2 = T(r=r_2)$  – температура на внешней поверхности защитной оболочки кабеля, контактирующей с окружающей средой;  $\lambda_c, \nu_c, \text{Pr}_c$  – коэффициент теплопроводности, коэффициент кинематической вязкости и число Прандтля воздуха окружающей среды при температуре  $T_c$ ;  $D_2 = 2r_2$  – наружный диаметр защитной оболочки кабеля;  $v_c$  – скорость ветра около внешней поверхности кабеля;  $\sigma = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$  – модифицированное значение константы Стефана–Больцмана;  $\varepsilon_2$  – степень черноты наружной поверхности защитной оболочки кабеля.

Вследствие того что величина лучистой составляющей коэффициента теплоотдачи зависит от температуры наружной поверхности защитной оболочки, то нахождение расчетным путем температуры наружной поверхности защитной оболочки  $T_2$  по формуле (5) осуществляется методом итераций.

Рассмотрим модель теплового контроля **двухжильного** кабеля (рис. 3).

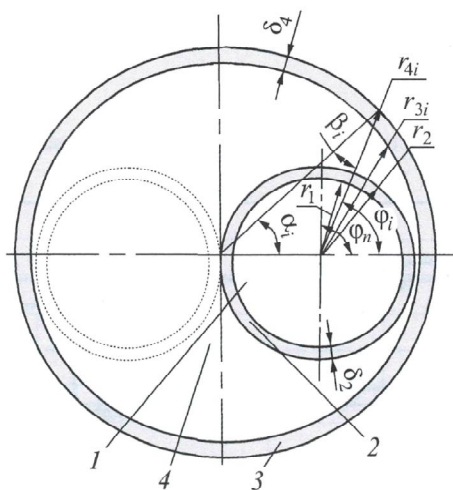


Рис. 3. Конструкция двухжильного кабеля:

1 – жила радиусом  $r_1$ ; 2 – защитная оболочка жилы толщиной  $\delta_2$ ; 3 – защитная оболочка кабеля толщиной  $\delta_4$ ; 4 – демпфирующая масса;  $r_2$  – общий радиус жилы (включающий в себя размер токопроводящей жилы и толщину защитной оболочки);  $\alpha_i, r_{4i}, \beta_i, r_{3i}, \varphi_i, \varphi_n$  – промежуточные обозначения, используемые для вывода математических формул

Решив дифференциальные уравнения (аналогично описанным выше) и проведя математические преобразования результатов с учетом симметрии теплового поля объекта относительно вертикальной плоскости, получим выражения для расчета температурного поля на внешней поверхности защитной оболочки кабеля.

Температура в  $i$ -м узле на наружной поверхности защитной оболочки кабеля рассчитывается по формулам:

$$T_{4i} = T_1 - \Delta T_i, \quad (6)$$

где

$$\Delta T_i = \frac{\pi q_V r_1}{\varphi_n} \frac{1}{2} \left[ \frac{r_1}{\lambda_2} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{r_1}{\lambda_3} \ln \frac{r_{3i}}{r_2} + \frac{r_1}{\lambda_4} \ln \frac{r_{4i}}{r_{3i}} \right], \quad (7)$$

$$T_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} T_{1i}, \quad T_{1i} = T_c + \frac{\pi q_V r_1}{\varphi_n} \frac{1}{2} \left[ \frac{r_1}{r_{4i}} \frac{1}{\alpha_{ci}} \right] + \Delta T_i; \quad (8)$$

$\lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$  – коэффициенты теплопроводности материалов защитной оболочки жилы, демпфирующей массы и защитной оболочки кабеля;  $\alpha_{ci}$  – значение локального коэффициента теплоотдачи на наружной поверхности защитной оболочки кабеля, которое рассчитывается по формуле (5) при использовании значений температур  $T_{4i}$ ;  $\varphi_n = \pi - \arctg \frac{r_c}{r_2}$ ;  $r_2 = r_1 + \delta_2$ ,  $r_c = 2r_2 + \delta_4$ ;  $n$  – количество узлов на наружной поверхности защитной оболочки.

Область угла  $\varphi_n$  разбивается на  $n$  участков, для каждого из которых определяются следующие геометрические параметры:

$$\varphi_i = (\varphi_n / n)i, \quad \beta_i = \arcsin \left[ \frac{r_2 \sin(\pi - \varphi_i)}{r_c} \right]; \quad (9)$$

$$\alpha_i = \varphi_i - \beta_i; \quad i = 0, \dots, n;$$

$$r_{4i} = \frac{r_c \sin n \alpha_i}{\sin(\pi - \varphi_i)}, \quad i = 1, \dots, n \quad \text{при } i = 0 \quad r_4 = r_c; \quad (10)$$

$$r_{3i} = r_{4i} - \frac{\delta_4}{\cos \beta_i}, \quad i = 1, \dots, n \quad \text{при } i = 0 \quad r_3 = r_2. \quad (11)$$

Рассмотрим модель теплового контроля **трехжильного** кабеля (рис. 4).

Вследствие тепловой симметрии относительно плоскостей, проходящих через продольную ось кабеля и расположенных по отношению друг к другу под углом  $120^\circ$ , вся теплота от каждой жилы отводится в окружающую среду в пределах угла  $2\varphi_n$ , величина которого определяется формулой

$$\varphi_n = \pi - \frac{\pi}{6} - \arctg \left[ 1 + \frac{1}{\cos(\pi/6)} - \sin(\pi/6) + \frac{\delta_4}{r_2} \right]. \quad (12)$$



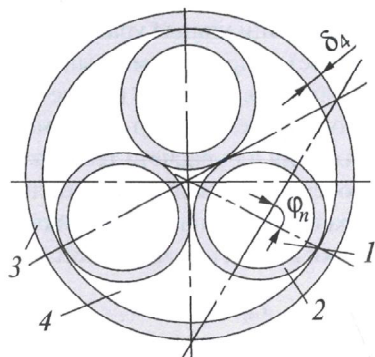


Рис. 4. Конструкция трехжильного кабеля:

1 – жила радиусом  $r_1$ ; 2 – защитная оболочка жилы толщиной  $\delta_2$ ; 3 – защитная оболочка кабеля толщиной  $\delta_4$ ; 4 – демпфирующая масса;  $\varphi_n$  – промежуточное обозначение;  $\delta_2$  – на рис. 4 не показана вследствие малости масштаба изображения

Область угла  $\varphi_n$  разбивается на  $n$  участков, для каждого из которых определяются следующие геометрические параметры:

$$\varphi_i = (\varphi_n/n)i, \beta_i = \arcsin \left[ \frac{r_2 \sin(\pi - \varphi_i)}{\cos \pi/6} \right]; \quad (13)$$

$$\alpha_i = \varphi_i - \beta_i; \quad i=0, \dots, n,$$

где  $r_2 = r_1 + \delta_2$ ,  $r_c = r_2[1 + 1/\cos(\pi/6)]\delta_4$ .

Текущие значения  $r_{3i}$  и  $r_{4i}$  определяются по формулам (10) и (11), а температура – по формулам (6–8).

Аналогично разработаны модели теплового контроля четырех- и пятижильного кабелей.

На основе разработанных моделей проведены расчеты температурного поля поверхности многожильных кабелей.

На рис. 5, 6 в виде графиков приведены результаты расчетов для двух- и трехжильных кабелей.

Введем понятие приведенного одножильного кабеля:

$$\begin{cases} S_{\text{экв.к}} = S_n \cdot n; \\ I_{\text{экв.к}} = I_n \cdot n; \\ D_{\text{экв.к}} = D_n. \end{cases} \quad (14)$$

Здесь  $S_n$  – площадь поперечного сечения одной жилы многожильного кабеля;  $n$  – количество жил многожильного кабеля;  $I_n$  – ток в многожильном кабеле;  $D_n$  – наружный диаметр многожильного кабеля;  $S_{\text{экв.к}}$ ,  $I_{\text{экв.к}}$ ,  $D_{\text{экв.к}}$  – площадь поперечного сечения жилы, ток и наружный диаметр эквивалентного одножильного кабеля.

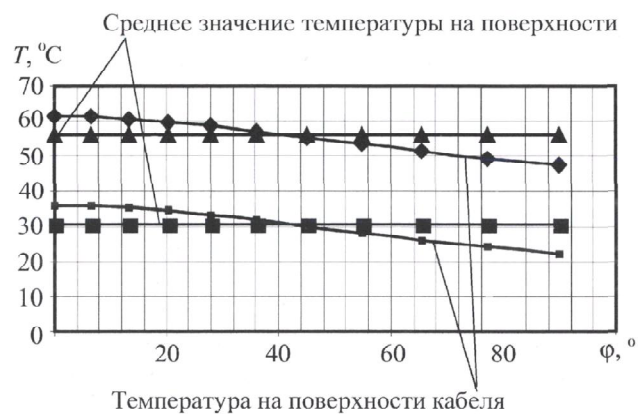


Рис. 5. Температура поверхности двухжильного кабеля ( $S = 25 \text{ мм}^2$ ,  $I = 140 \text{ А}$  – каждой жилы) с защитными оболочками толщиной  $\delta_2 = \delta_4 = 2 \text{ мм}$  ( $\lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4 = 0,154 \text{ Вт/(м·К)}$ ) при температуре среды  $T_c = 20 \text{ °С}$

Определим температуру на внешней поверхности приведенного одножильного кабеля с параметрами, эквивалентными многожильному кабелю и соответствующими значениями электрической нагрузки, определенными по (14) для двух условий эксплуатации: скорости ветра 5 и 0,5 м/с, которые на практике определяют две предельные величины ветровой нагрузки.

Результаты расчетов приведены в таблице.

В таблице использованы следующие обозначения:  $T_{\text{ср}}$  – среднее значение температуры по поверхности кабеля;  $\Delta T_{\text{ср}}$  – погрешность средней температуры относительно максимальной температуры на поверхно-

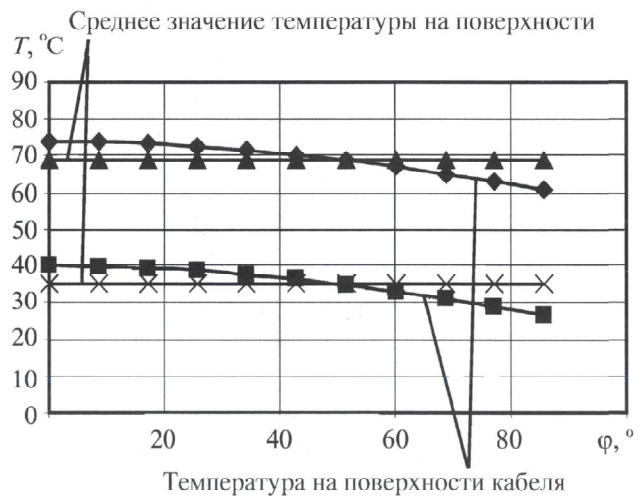


Рис. 6. Температурное поле поверхности трехжильного кабеля ( $S = 25 \text{ мм}^2$ ,  $I = 140 \text{ А}$  – каждой жилы) с защитными оболочками толщиной  $\delta_2 = \delta_4 = 2 \text{ мм}$  ( $\lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4 = 0,154 \text{ Вт/(м·К)}$ ) при температуре среды  $T_c = 20 \text{ °С}$



Температура поверхности приведенного одножильного кабеля, °С

n	v = 0,5 м/с		v = 5,0 м/с		v = 0,5 м/с		v = 5,0 м/с	
	T <sub>ср</sub>	ΔT <sub>ср</sub>	T <sub>ср</sub>	ΔT <sub>ср</sub>	T <sub>экв.к</sub>	ΔT <sub>экв.к</sub>	T <sub>экв.к</sub>	ΔT <sub>экв.к</sub>
1	54,5	0	48,1	0	54,5	0	48,1	0
2	56,0	5,4	30,7	5,4	53,1	2,9	29,7	1,0
3	69,0	4,9	35,0	4,9	65,4	3,6	33,9	1,1
4	72,0	3,8	41,0	3,8	68,2	3,8	39,6	1,4
5	74,2	2,1	42,5	3,0	70,4	3,8	40,9	1,6

сти кабеля; T<sub>экв.к</sub> — температура соответствующего приведенного одножильного кабеля; ΔT<sub>экв.к</sub> — разность между температурой приведенного одножильного кабеля и средней температурой соответствующего многожильного кабеля.

На рис. 7 показаны зависимости погрешности приведения многожильного кабеля к одножильному по формуле (14).

Из таблицы и рис. 7 видно, что для пяти типов многожильных кабелей понятие приведенного одножильного кабеля правомочно, так как величина ΔT<sub>экв.к</sub> не превышает 5% от T<sub>ср</sub> и T<sub>экв.к</sub> для двух крайних условий эксплуатации по скорости ветра. Это дает возможность обоснованно предположить, что использо-

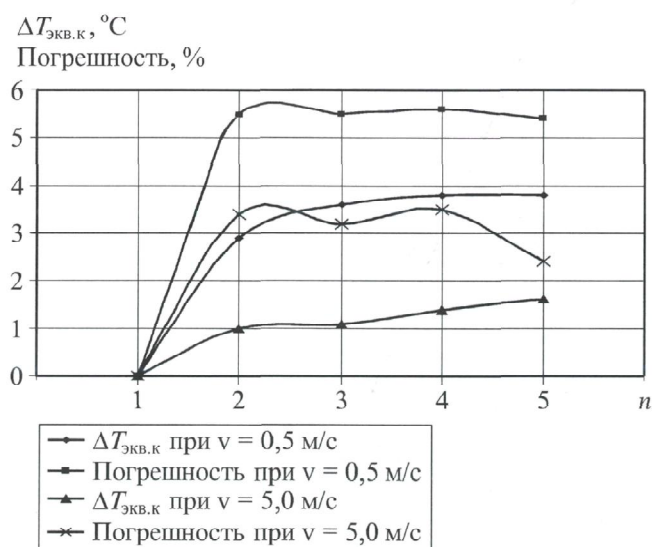


Рис. 7. Погрешность приведения по формуле (14)

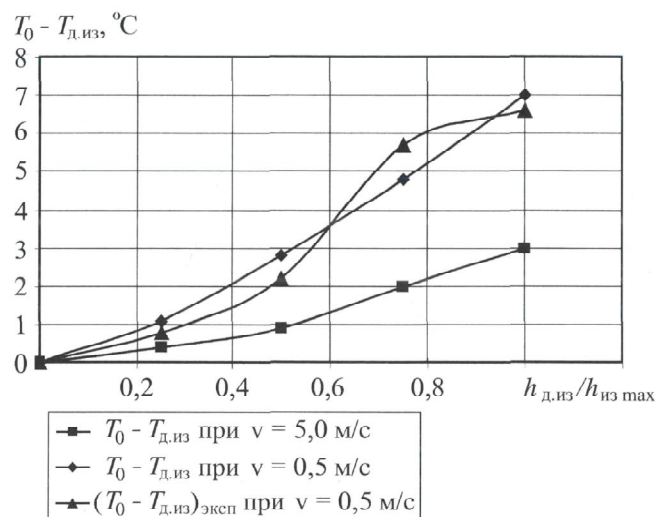


Рис. 8. Зависимость изменения температуры на наружной поверхности кабеля от уменьшения толщины изоляции: S = 6 мм<sup>2</sup>, I = 50 А, T<sub>с</sub> = 20 °С, T<sub>0</sub> — начальная температура контролируемой поверхности

вание понятия приведенного одножильного кабеля возможно и для многожильных кабелей с n > 5.

Таким образом, математическая модель теплового контроля многожильного кабеля включает следующие этапы.

1. Приведение многожильного кабеля к одножильному в соответствии с (14).
2. Модельный расчет температурного поля с использованием выражений (1–5) с учетом S<sub>экв.к</sub>, I<sub>экв.к</sub>, D<sub>экв.к</sub> — площади поперечного сечения жилы, тока и наружного диаметра эквивалентного одножильного кабеля.

С помощью разработанной математической модели исследуем возможности теплового контроля дефектов электрических кабелей по уменьшению толщины изоляции и глубины излома токопроводящей жилы. С учетом сказанного эксперименты проводили на одножильном кабеле.

На рис. 8, 9 приведены некоторые зависимости данного исследования.

На практике обычно принимают величину температурной чувствительности при проведении теплового контроля (с учетом чувствительности тепловизионной аппаратуры, величины шумов и т.п.), равной ΔT<sub>контр</sub> = 0,2 °С.

Таким образом, на основании зависимостей, приведенных на рис. 6, 7, решая уравнения

$$\begin{aligned} \Delta T_{\text{контр}} &= f(h_{\text{из}}), \\ \Delta T_{\text{контр}} &= f(h_{\text{л.ж}}), \end{aligned} \quad (15)$$



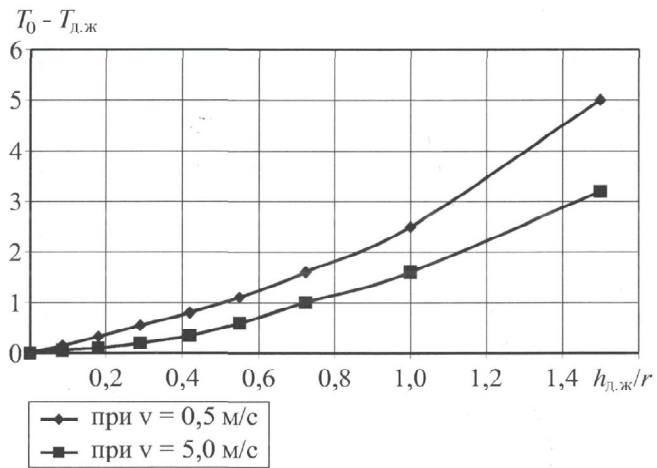


Рис. 9. Зависимость температуры на поверхности кабеля от величины излома токопроводящей жилы:  $r = 1,38$  мм (радиус токопроводящей жилы),  $I = 50$  А,  $T_c = 20$  °С;  $T_0$  – начальная температура контролируемой поверхности

где  $h_{из}$  – толщина изоляции;  $h_{д.ж}$  – глубина дефекта (излома) жилы, определяется чувствительность теплового контроля к обнаружению дефектов:  $h_{д.из}/h_{из.мах} = 0,15$ ,  $h_{д.ж}/r = 0,25$  ( $h_{д.из}$  – глубина дефекта изоляции;  $h_{из.мах}$  – толщина изоляции).

Аналогичные исследования проведены для различных комбинаций параметров одножильного кабеля.

Полученная величина чувствительности к обнаружению дефектов кабелей вполне приемлема для практического использования при контроле кабелей воздушного расположения.

Эксперименты проводили на образцах одножильных электрических кабелей и состояли в регистрации температурного поля поверхности кабелей тепловизионной аппаратурой. При этом в кабелях были изготовлены искусственные дефекты (изменения толщины изоляции и излом токопроводящей жилы) с дискретностью, определенной в соответствии с (15).

На рис. 10 приведены фотографии исследуемого кабеля с искусственным дефектом изоляции, на рис. 11 – термограммы поверхности кабеля с различ-

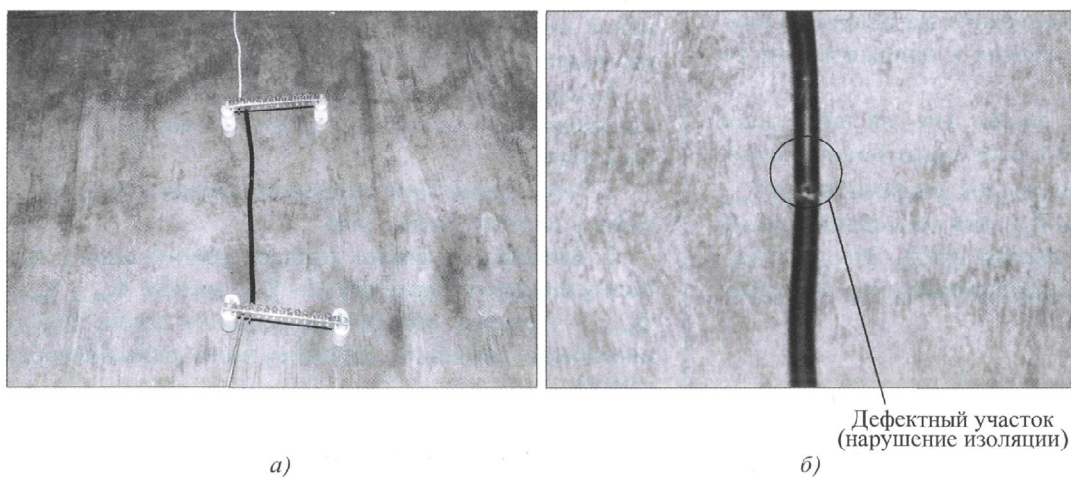


Рис. 10. Фотографии кабеля с искусственными дефектами:

а – схема подключения кабеля с дефектами; б – участок кабеля с дефектом

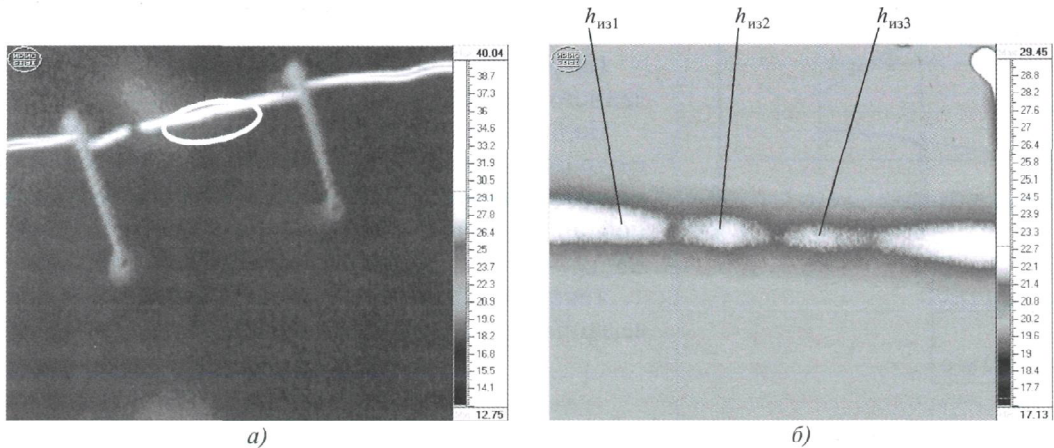


Рис. 11. Термограммы кабеля с искусственными дефектами:

а – термограмма кабеля (ток ниже номинального); б – термограмма участка кабеля (выделенного на рис. 11, а белым контуром) с дефектами (ток номинальный):  $h_{из1} = 0,8 H$ ,  $h_{из2} = 0,5 H$ ,  $h_{из3} = 0,2 H$ , где  $H$  – полная толщина изоляции,  $h_{из}$  – глубина нарушения изоляции





ными по величине дефектами теплоизоляции. Аналогичные термограммы зарегистрированы и для другого типа дефектов.

Статистическая обработка [3] результатов экспериментальных и теоретических исследований показала, что различие не превышает 6 %, что вполне приемлемо на практике.

#### Выводы

1. Разработан метод теплового контроля безопасности эксплуатации силовых электрических кабелей и электропроводки, эксплуатируемых в атмосферных условиях, обеспечивающих достоверное обнаружение дефектов.

2. Разработана математическая модель теплового контроля многожильных кабелей, реализованная в виде программного обеспечения и применимая на практике для оперативного анализа возможностей контроля различных объектов.

3. Предложена методика исследований чувствительности теплового метода к обнаружению дефектов. В качестве примера определена чувствительность для одного из типов кабеля: относительное изменение толщины изоляции на 0,15 мм и относительное изменение толщины электропроводной жилы на 0,25 мм.

4. На основании теоретических и экспериментальных исследований разработана методика теплового контроля кабелей и электропроводки, эксплуатируемых в атмосферных условиях, обеспечивающая достоверное и производительное обнаружение дефектов и при необходимости осуществляющая их идентификацию.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Статистические** данные ГУ МЧС России за 2003–2006 гг.
2. **Будадин О.Н., Потапов А.И., Колганов В.И. и др.** Тепловой неразрушающий контроль изделий. М.: Наука, 2002. 472 с.
3. **Смоляк С.А., Титаренко Б.П.** Устойчивые методы оценивания. М.: Статистика, 1980. 208 с.
4. **Безносов Б.Л., Городецкий С.С., Гроднев И.И. и др.** Кабели и провода. Т. I. Основы теории, расчет и конструирование / под общ. ред. В.А. Привезенцева и А.В. Линкова. М.: Госэнергоиздат, 1959. 298 с.
5. **Брагин С.М.** Электрический и тепловой расчет кабеля. М.: Госэнергоиздат, 1990. 325 с.
6. **Основы** кабельной техники: учеб. пособие для вузов / под ред. В.А. Привезенцева. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергия, 1975. 472 с.