

УДК 614.841.5

В.И. Зыков, Г.Н. Малашенков  
(Академия Государственной противопожарной службы МЧС России;  
e-mail: info@academygps.ru)

## МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ ПРОВОДОВ И КАБЕЛЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Рассмотрены результаты экспериментальных исследований пожарной опасности тепловых проявлений токов утечки. Разработана математическая модель для оценки пожарной опасности электрических сетей, с помощью которой появляется возможность определять температуру изоляции электрических проводов в зависимости от режима их эксплуатации и продолжительности работы. На основе полученных результатов решена актуальная проблема по определению пожароопасных значений мощности и силы токов утечки, что имеет практическую направленность и непосредственно связано с обеспечением пожарной безопасности проводов и кабелей электрических сетей.

Ключевые слова: пожарная опасность электрических сетей, ток утечки, математическая модель, электрический кабель.

## V.I. Zikov, G.N. Malashenkov MODEL FOR EVALUATION OF A FIRE HAZARD OF WIRES AND CABLES OF ELECTRICAL NETWORKS

Results of experimental researches of a fire hazard of thermal displays of leakages are considered. The mathematical model for evaluation a fire hazard of electrical networks with which help there is a possibility to define temperature of isolation of electric conductings depending on a mode of their operation and an uptime is developed. On the basis of the received results the actual problem by definition of fire-dangerous sizes of power and of leakages that has a practical orientation on maintenance of fire safety of wires and cables of electrical networks is decided.

Key words: a fire hazard of electrical networks, a leakage, mathematical model, the electric cable.

### ***Исследование пожарной опасности токов утечки***

Одной из причин возникновения пожароопасной ситуации в электрических сетях является нарушение изоляции и оболочки электрического кабеля вследствие его старения или механического повреждения. Пожарная опасность при этом связана с тепловым проявлением тока утечки, а из всех параметров, характеризующих ток утечки, принципиальное значение имеют сопротивление изоляции, длительность и сила тока утечки.

Электрические сети переменного тока напряжением до 1000 В могут быть выполнены как с глухозаземленной, так и с изолированной нейтралью. Каждое исполнение имеет свои достоинства и недостатки, которые оценивают по четырем основным критериям: электробезопасность, пожар-

ная безопасность, надежность электроснабжения и экономичность. Вопросы электробезопасности, надежности, электроснабжения, экономичности подробно рассмотрены рядом авторов [1, 2]. Однако в этих работах не в полном объеме рассматривались вопросы обеспечения пожарной безопасности электрических сетей. Особенностью электрических сетей с изолированной нейтралью, по сравнению с другими сетями, следует считать то, что в подобных сетях допускается продолжительная работа кабельных линий с замыканием фазы на землю. Поэтому можно сделать предположение, что длительное протекание даже незначительного локального тока утечки может привести к выделению на поврежденном участке изоляции оболочки электрического кабеля тепла, достаточного для того, чтобы произошло короткое замыкание между фазами [3].

Однофазные замыкания на корпус в таких системах могут иметь различные формы. Наиболее часто возникают замыкания через локально поврежденные изоляцию и оболочку электрического кабеля на землю (корпус). Как показывает анализ выполненных экспериментальных исследований, именно такие замыкания (через определенное переходное сопротивление) и являются наиболее пожароопасными. В результате локального разрушения изоляционного материала образуется токопроводящий слой, и при протекании тока утечки на этом участке может выделяться значительное количество тепла.

Мощность в месте протекания тока утечки может быть определена с помощью следующего выражения:

$$P = 3/2 \omega \cdot C_{\phi} \cdot U_{\phi}, \quad (1)$$

где  $C_{\phi}$  – ёмкость фазы относительно корпуса;

$\omega = 2 \pi f$  – угловая частота;

$U_{\phi}$  – напряжение между фазами.

Максимальная мощность при этом будет выделяться на сопротивлении изоляции  $R_{из}$ , определяемом по формуле:

$$R_{из} = 1/3 \omega C_{\phi}. \quad (2)$$

Процесс длительного воздействия локального тока утечки был экспериментально исследован рядом авторов. Согласно опубликованным данным, в электрических кабелях с резиновой изоляцией и резиновой оболочкой мощность, которая не вызовет воспламенения, составляет от 20 до 40 Вт [5]. Однако авторы не указывают при этом типоразмеры кабелей, для которых было определено пожаробезопасное значение мощности. В связи с этим проведение экспериментальных исследований по определению пожароопасных значений мощности и силы тока утечки является

весьма актуальной проблемой, имеющей практическую направленность.

Для проведения эксперимента использовались известные экспериментальная установка и методика проведения испытаний, которые описаны в работе [6]. Сущность метода состояла в имитации локального тока утечки, величина которого изменялась подбором емкостей между фазами и землей при его протекании через поврежденный участок изоляции. Для имитации тока утечки в оболочке и изоляции кабеля высверливались отверстия до токопроводящей жилы, которое плотно заполнялось измельченными продуктами горения резины и соединялось с помощью контактного устройства с пластиной, заменяющей землю в электрической сети объекта. В ходе эксперимента регистрировались время от начала испытаний, сила тока утечки, падение напряжения на поврежденном участке изоляции и оболочки кабеля, мощность тепловыделения и температура в непосредственной близости от места повреждения. В качестве контролируемого параметра была выбрана мощность тепловыделения, так как именно данный параметр может быть достаточно легко рассчитан.

В качестве образцов были выбраны кабели различного типоразмера: КРШС 4×35, КРШС 3×16 и КУПР 7×0,5. Результаты испытаний определялись по 5 измерениям с доверительной вероятностью  $P = 0,95$ . Для определения доверительных границ погрешности измерений использовалось распределение Стьюдента. В табл. 1 приведены значения  $T_{cp}$  – температуры превышения на оболочке кабеля на расстоянии 5 мм от локального места повреждения изоляции в зависимости от тепловой мощности –  $P$ .

Таблица 1

Значения температуры превышения на оболочке кабеля  
в зависимости от тепловой мощности

| КРШС 4×35 |              | КРШС 3×16 |              | КУПР 7×0,5 |              |
|-----------|--------------|-----------|--------------|------------|--------------|
| $P, Вт$   | $T_{cp}, °C$ | $P, Вт$   | $T_{cp}, °C$ | $P, Вт$    | $T_{cp}, °C$ |
| 8         | 110 + 6      | 9         | 130 + 11     | 8          | 120 + 15     |
| 10        | 120 + 10     | 10        | 140 + 15     | 8,5        | 160 + 12     |
| 14        | 233 + 11     | 13        | 223 + 14     | 10         | 190 + 11     |
| 25        | 330 + 15     | 25        | 355 + 17     | 19         | 300 + 12     |

Анализ полученных результатов показывает, что температура на оболочке электрического кабеля определяется мощностью тепловыделения и тепловыми потерями, связанными с типоразмерами кабеля.

Для определения пожароопасного значения мощности был сделан термический анализ материалов, использованных в конструкциях кабелей на термоаналитическом комплексе Du Pont-9900, результаты которого приведены в табл. 2 [7].

Данные термического анализа конструктивных материалов кабелей

| Материал                  | Показатель                        |                               |                                   |
|---------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
|                           | Температура начала разложения, °С | Температура воспламенения, °С | Температура самовоспламенения, °С |
| Резиновая оболочка кабеля | 104                               | 300-360                       | 500-540                           |
| Резиновая изоляция кабеля | 196                               | 300-360                       | 500-540                           |

Используя зависимость  $T_{cp} = F(P)$  и результаты термического анализа в соответствии с критерием безопасности  $T_{cp} < T_{воспл}$ , можно сделать заключение о пожароопасном значении мощности.

Для определения пожароопасного значения силы тока утечки была проведена серия дополнительных экспериментов. С учетом результатов проведенных исследований в первой серии экспериментов обеспечивалось условие, когда при протекании тока через сопротивление достигалась мощность выделения теплоты, равная  $18 \text{ Вт}$ .

Проведенные экспериментальные исследования показали, что через 10 часов после начала проведения эксперимента падение напряжения и ток на поврежденном участке изоляции оболочки электрического кабеля изменялись незначительно. В дальнейшем отмечалось появление электрических микродуг, дыма и свечения вблизи искусственного повреждения оболочки кабеля. Одновременно приборами было зарегистрировано резкое падение напряжения в месте повреждения изоляции, что потребовало для поддержания заданного значения мощности тепловыделения постоянно уменьшать ток утечки. Так, если в начале эксперимента ток был равен  $4,5 \pm 0,2 \text{ А}$ , то в конце –  $0,2 \pm 0,05 \text{ А}$ . Через 20 часов после начала испытаний произошло короткое замыкание между фазами электрической сети, которое сопровождалось воспламенением предварительно прогретой оболочки кабеля и разлетом раскаленных частиц металла в радиусе порядка  $0,9 \text{ м}$ .

### ***Математическое моделирование для оценки пожарной опасности проводов и кабелей электрических сетей***

Результаты экспериментальных исследования подтвердили, что одним из опасных проявлений электрического тока, с точки зрения пожарной опасности, безусловно является его тепловое действие. Проводники, по которым течёт ток, превышающий расчётное значение, начинают перегреваться. При этом может возникать температура, приводящая к воспламенению изоляции, что может служить причиной пожара. Температура токопроводящей жилы зависит от силы протекающего тока, температуры окружающей среды, диаметра жилы и изоляции проводника, теплообмена с

окружающей средой, удельного сопротивления материала проводника, времени аварийного режима работы.

Моделирование локальных токов утечки по электрическим кабелям с резиновой изоляцией показывает, что температура на оболочке кабеля в месте утечки тока определяется мощностью тепловыделения и тепловыми потерями, связанными с типоразмерами электрического кабеля. При этом было установлено, что мощность локальных токов утечки менее  $14 \text{ Вт}$  не приводит к пожароопасным последствиям, а превышение величины локальных токов утечки более  $88 \text{ мА}$  приводит к наиболее пожароопасному режиму, а именно, к короткому замыканию между фазами электрической сети.

На рис. 1 представлен график изменения температуры оболочки электрического кабеля марки КРПГ  $3 \times 16$  во времени при мощности тока утечки –  $18 \text{ Вт}$ .

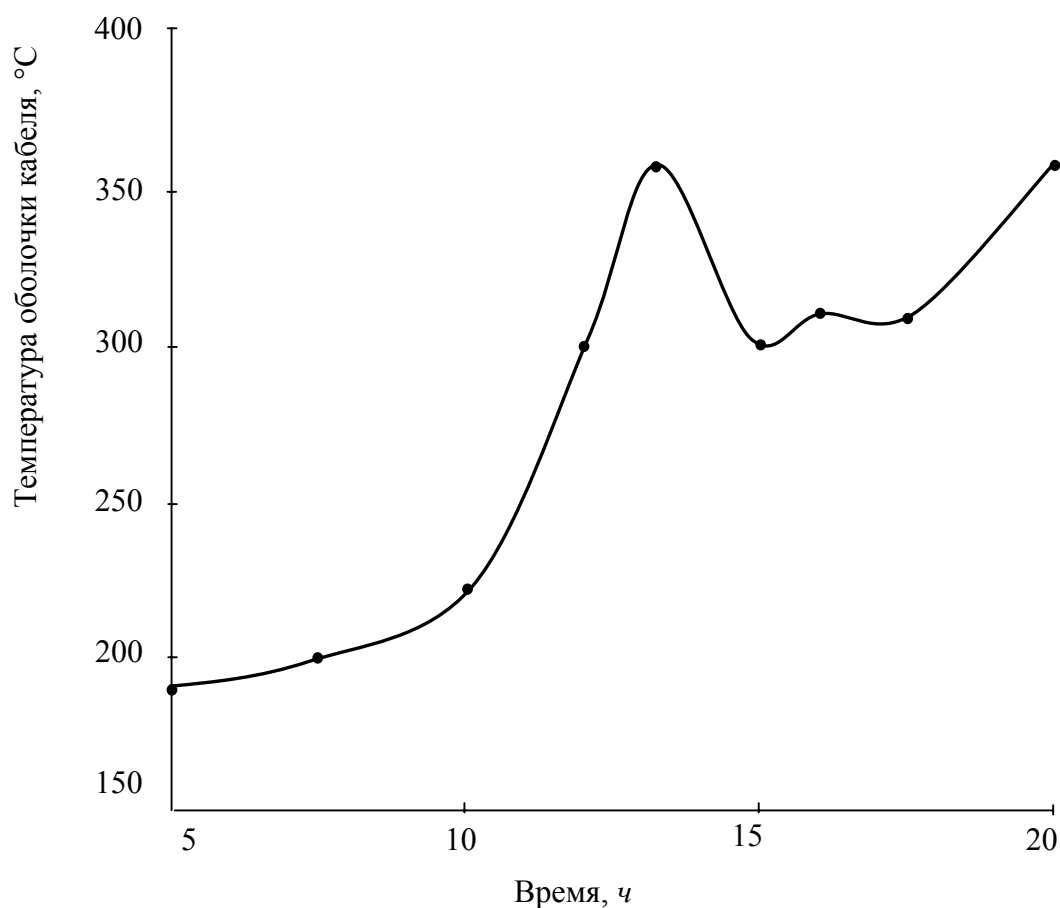


Рис. 1. Изменение температуры нагрева оболочки кабеля во времени

Как видно из рис. 1, вначале эксперимента температура на оболочке кабеля составляет около 200 °С, а через 10 часов с момента начала эксперимента наблюдается резкое увеличение температуры (более 350 °С). Это обусловлено тем, что разложение изоляции жил кабеля под воздействием локального источника тепла привело к появлению дополнительного источника, вызванного протеканием тока между фазами электрической сети. После 13 часов эксперимента наблюдается незначительное снижение температуры, а затем повторный её рост. Через 20 часов после начала испытаний произошло короткое замыкание между фазами электросети, которое сопровождалось воспламенением предварительно прогретой оболочки кабеля и разлётом раскалиённых частиц металла в радиусе около 0,9 м.

Дальнейшими экспериментальными исследованиями установлено, что только при уменьшении мощности выделения теплоты до 14 Вт в течение всего эксперимента наблюдалось незначительное увеличение температуры оболочки кабеля до 180 °С. Эта температура не превысила температуру в начале разложения материала изоляции жил кабеля. Результаты повторных испытаний показали их удовлетворительную сходимость.

Кроме того, были установлены максимально допустимые температуры нагрева проводов и кабелей. Так для отечественных проводов и кабелей (с изоляцией из ПВХ и резины) температура нагрева составляет 120 °С, а с изоляцией из полиэтилена – 104 ÷ 108 °С [6].

Таким образом, было установлено, что условия пожаробезопасности токов утечки могут быть обеспечены, если фактические значения тепловой мощности  $P_{\text{факт}}$ , тока  $I_{\text{факт}}$  и ёмкости фаз  $C_{\text{факт}}$  будут ниже аналогичных допустимых значений:  $P_{\text{факт}} < 14 \text{ Вт}$ ;  $I_{\text{факт}} < 0,088 \text{ А}$ ;  $C_{\text{факт}} < 0,6 \text{ мкФ}$ .

Как известно, аппараты защиты срабатывают не мгновенно, а являются устройствами инерционными. При этом очень важно оценить температуру (а значит и пожарную опасность), до которой разогреется электропроводка. С учетом того, что аппараты защиты являются инерционными устройствами, важно установить температуру, до которой разогревается электропроводка, пока ток не будет отключен аппаратом защиты.

На основе уравнения теплового баланса получена зависимость температуры нагрева изоляции электрического провода от силы протекающего тока и времени его действия:

$$T(t) = T_{\text{в}} + \frac{T_{\text{в}}}{\psi_1} [\psi_2(\omega - 1)t + \psi_2^2 \omega(\omega - 1) \frac{t^2}{2!} + \psi_2^3 \omega(\omega - 1)(3\omega - 2) \frac{t^3}{3!}], \quad (3)$$

где  $\omega, \psi_1, \psi_2, \delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5, \delta_6$  – комплекс переменных величин, определяемых как:

$$\begin{aligned} \omega &= \frac{\delta_1(\delta_3 + \delta_5)}{(1 + \delta_4)(\delta_6 - \delta_2)} + 1; & \psi_2 &= \frac{\delta_3 + \delta_5}{1 + \delta_4}; & \psi_3 &= \frac{\delta_6 - \delta_2}{1 + \delta_4}; \\ \delta_1 &= \frac{I^2 \rho_{\text{ж}^0}}{S_{\text{ж}}^2 \gamma_{\text{ж}} C_{\text{ж}^0} T_{\text{в}}}; & \delta_2 &= \frac{I^2 \rho_{\text{из}^0} \alpha}{S_{\text{из}}^2 \gamma_{\text{из}} C_{\text{из}^0}}; & \delta_3 &= T_{\text{в}} \varphi_{\text{ж}}; \\ \delta_4 &= \frac{\gamma_{\text{из}} S_{\text{из}} C_{\text{из}^0}}{\gamma_{\text{ж}} S_{\text{ж}} C_{\text{ж}^0}}; & \delta_5 &= \frac{\gamma_{\text{из}} S_{\text{из}} C_{\text{из}^0} \varphi_{\text{из}} T_{\text{в}}}{\gamma_{\text{ж}} S_{\text{ж}} C_{\text{ж}^0}}; & \delta_6 &= \frac{2\pi r_{\text{из}} a}{\gamma_{\text{ж}} S_{\text{ж}} C_{\text{ж}^0}}; \end{aligned}$$

$T_{\text{в}}$  – первоначальная температура воздуха, °С;  $I$  – сила тока, А;  $t$  – время, с;  $r_{\text{из}}$  – радиус от центра жилы до наружного края изоляции, м;  $S_{\text{ж}}, S_{\text{из}}$  – площадь поперечного сечения жилы и изоляции, соответственно,  $\text{м}^2$ ;  $C_{\text{ж}}, C_{\text{из}}$  – теплоёмкость материала жилы и изоляции, соответственно, Дж/град;  $\gamma_{\text{ж}}, \gamma_{\text{из}}$  – плотность материала жилы и изоляции, соответственно,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $a$  – коэффициент теплопередачи от изоляции в воздух,  $\text{Вт}/\text{м}^2$  град;  $\rho_{\text{ж}^0}, C_{\text{ж}^0}, C_{\text{из}^0}$  – начальные значения удельного электрического сопротивления, теплоёмкости жилы и изоляции;  $\alpha$  – термический коэффициент удельного электрического сопротивления материала жилы;  $\varphi_{\text{ж}}, \varphi_{\text{из}}$  – термический коэффициент теплоёмкости материала жилы и изоляции, соответственно.

Выражение (3) может быть использовано в качестве математической модели для оценки пожарной опасности электрических сетей, которое позволяет определять температуру изоляции электрических проводов в зависимости от режима их эксплуатации и продолжительности работы.

С использованием разработанной математической модели проведены аналитические расчёты температурного режима эксплуатации провода марки ПВ1×2,5 при различных значениях тока нагрузки и времени (табл. 3).

Результаты теоретических исследований нагрева  
провода марки ПВ 1×2,5

| Вре-<br>мя, с | Токи нагрузки, А           |                            |                   |                            |                            |                   |                            |                            |                   |
|---------------|----------------------------|----------------------------|-------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------|
|               | 40                         |                            |                   | 50                         |                            |                   | 60                         |                            |                   |
|               | $T_{\text{теор.}}$ ,<br>°С | $T_{\text{эксп.}}$ ,<br>°С | $\Delta T$ ,<br>% | $T_{\text{теор.}}$ ,<br>°С | $T_{\text{эксп.}}$ ,<br>°С | $\Delta T$ ,<br>% | $T_{\text{теор.}}$ ,<br>°С | $T_{\text{эксп.}}$ ,<br>°С | $\Delta T$ ,<br>% |
| 0             | 20                         | 19,5                       | 2,56              | 20                         | 20                         | 0                 | 20                         | 20                         | 0                 |
| 10            | 26,94                      | 26                         | 3,62              | 30,76                      | 30,5                       | 0,85              | 35,34                      | 36                         | -1,83             |
| 20            | 33,67                      | 34                         | -0,97             | 41,02                      | 41,5                       | -1,16             | 49,69                      | 52                         | -4,44             |
| 30            | 40,22                      | 41,5                       | -3,08             | 50,85                      | 49                         | 3,78              | 63,16                      | 67                         | -5,73             |
| 40            | 46,58                      | 47,5                       | -1,9              | 60,24                      | 61                         | -1,25             | 75,78                      | 82                         | -7,59             |
| 50            | 52,77                      | 55                         | -4,05             | 69,23                      | 71,5                       | -3,17             | 87,62                      | 95,5                       | -8,25             |
| 60            | 58,77                      | 61                         | -3,66             | 77,81                      | 80,5                       | -3,34             | 98,71                      | 110,5                      | -10,67            |
| 70            | 64,60                      | 67                         | -3,58             | 86,02                      | 90,5                       | -4,95             | 109,13                     | 125                        | -12,7             |
| 80            | 70,27                      | 74                         | -5,04             | 93,86                      | 99                         | -5,19             | 118,91                     | 136,5                      | -12,8             |
| 90            | 75,78                      | 79                         | -4,08             | 101,37                     | 107                        | -5,26             | 128,14                     | 141                        | -9,12             |
| 100           | 81,13                      | 85                         | -4,55             | 108,56                     | 114                        | -4,77             | 136,86                     | 144                        | -4,96             |
| 110           | 86,33                      | 90,5                       | -4,61             | 115,44                     | 120,5                      | -4,2              | 145,13                     | 149,5                      | -2,92             |
| 120           | 91,38                      | 95                         | -3,81             | 122,05                     | 126                        | -3,13             | 152,99                     | 159                        | -3,78             |
| 130           | 96,29                      | 99                         | -2,74             | 128,39                     | 133                        | -3,47             | 160,52                     | 168                        | -4,45             |
| 140           | 101,07                     | 103                        | -1,87             | 134,49                     | 138                        | -2,54             | 167,76                     | 178                        | -5,75             |
| 150           | 105,72                     | 105                        | 0,68              | 140,36                     | 145                        | -3,2              | 174,77                     | 187                        | -6,54             |
| 160           | 110,24                     | 108                        | 2,07              | 146,03                     | 150                        | -2,65             | 181,61                     | 195                        | -6,84             |
| 170           | 114,64                     | 110                        | 4,22              | 151,50                     | 154                        | -1,62             | 188,34                     | 203                        | -7,22             |
| 180           | 118,9                      | 112                        | 6,17              | 156,7                      | 157,5                      | -0,45             | 194,9                      | 210,5                      | -7,37             |

На рис. 2 представлены теоретические и эксплуатационные характеристики изменения температуры нагрева провода марки ПВ 1×2,5 в зависимости от времени.

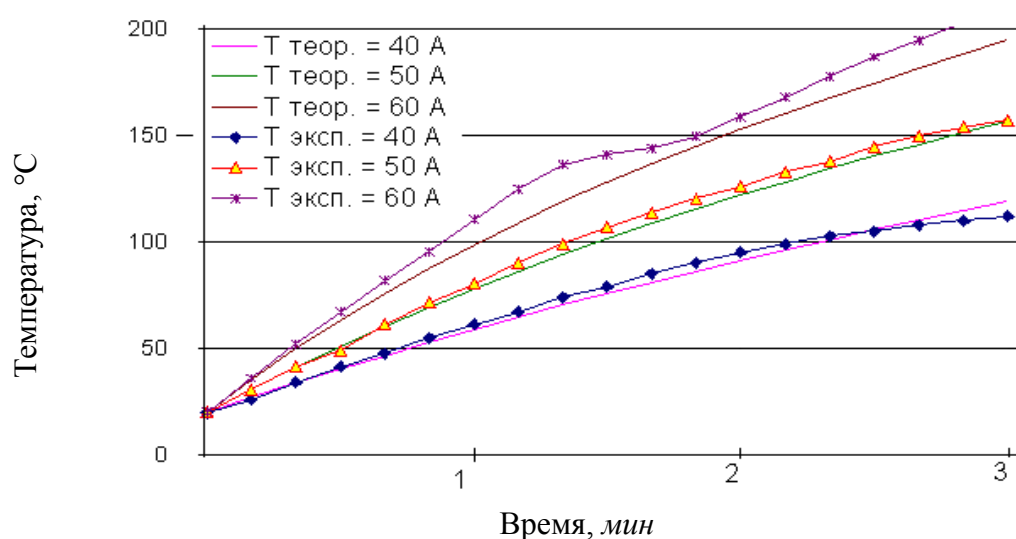


Рис. 2. Температурно-временные характеристики эксплуатации провода марки ПВ 1×2,5



### **Выводы и предложения**

1. Определение пожароопасных значений мощности и силы токов утечки является актуальной проблемой, имеющей практическую направленность, непосредственно связанную с обеспечением пожарной безопасности проводов и кабелей электрических сетей.

2. Разработанная математическая модель для оценки пожарной опасности проводов и кабелей электрических сетей позволяет определять зависимость температуры нагрева изоляции электрических проводов от силы протекающего тока и длительности его воздействия.

3. Определены условия пожаробезопасности токов утечки в кабелях с резиновой изоляцией, которые могут быть обеспечены, если фактические значения мощности в электрической цепи тока утечки составляют  $P_{ут} \leq 14 \text{ Вт}$ , а сила локального тока утечки –  $I_{ут} \leq 0,088 \text{ А}$ . Данный подход к определению фактических параметров пожароопасных режимов работы ряда типов проводов и кабелей позволяет обеспечить пожарную безопасность электрических сетей на этапе проектирования и разработки.

4. По результатам анализа нормативно-технической документации определено, что силовые и монтажные провода не подлежат обязательной сертификации в области пожарной безопасности. Учитывая большое количество пожаров от этого вида электрических изделий необходимо включить силовые и монтажные электрические провода в "Перечень продукции, подлежащей обязательной сертификации в области пожарной безопасности".

#### **Литература**

1. Черкасов В.Н., Костарев Н.П. Пожарная безопасность электроустановок. - М.: Академия ГПС МЧС России, 2002. –377 с.

2. Смелков Г.И., Смирнов В.В., Сашин В.Н. Пожарная опасность длительных по времени локальных токов утечки в электрических сетях с изолированной нейтралью // Пожаровзрывобезопасность, № 4, 1994.

3. Монахов В.Т. Методы исследования пожарной опасности веществ. -М.: Химия, 1972. -414 с.

4. Смелков Г.Н., Александров А.А., Пехотиков В.А. Методы определения причастности к пожарам аварийных режимов в электротехнических устройствах. – М.: Стройиздат, 1980. – 87 с.

5. Тюгай С.И., Смирнов В.В., Иванов Е.А. Нормирование токов утечки на корпус по условиям пожаробезопасности. – Изв. ГЭТУ, 1993. Вып. 463. –С. 52-58.

6. Поединцев И.Ф., Смирнов В.В., Бойцов В.Ф. Методика исследования зажигания оболочки кабеля локальными токами утечки // В сб. "Вопросы развития и автоматизации судовых электроэнергетических систем". ВНТО им. Акад. А.Н. Крылова. Вып. 521. – Л., 1992. –С. 64-68.

7. Зыков В.И., Анисимов Ю.Н., Малашенков Г.Н. Противопожарная защита электрических сетей от токов утечки // Снижение риска гибели людей при пожарах: Материалы XVIII науч.-практ. конф., Ч.1. -М.: ВНИИПО, 2003. –С. 182-185.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 22 апреля 2009 г.