

И.А. Бершадский /д.т.н./, А.В. Згарбул, А.А. Кулиш
 ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБА ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ НАПРЯЖЕНИЕМ 220 В ОТ ПЕРЕГРУЗОК С УЧЕТОМ НЕСТАЦИОНАРНОГО НАГРЕВА ЭЛЕКТРОПРОВОДКИ

На основании применения метода конечных элементов определена зависимость времени нагрева двухжильного кабеля при протекании электрического тока. Дано сравнение результатов численных расчетов с экспериментальными данными. Разработан метод, позволяющий установить прогнозируемое время допустимой перегрузки кабеля, и предложен способ, реализующий микропроцессорное устройство тепловой защиты электропроводки напряжением 220 В.

Ключевые слова: электропроводка, нагрев, перегрузка, тепловая защита, микропроцессорное устройство.

Постановка проблемы

Для обеспечения безопасности жилых и общественных зданий большое значение имеет предотвращение пожароопасного перегрева, возникающего при перегрузках и удаленных коротких замыканиях с малыми кратностями тока K по отношению к длительно допустимому току электропровода (кабеля).

Перегрев изоляции проводников выше предельно допустимой температуры приводит к развитию пожароопасной ситуации и дальнейшему короткому замыканию (КЗ).

Наиболее распространенными аппаратами защиты в настоящее время являются автоматические выключатели (АВ) различных производителей (ABB, IEK и др.), которые почти повсеместно вытесняют плавкие предохранители и автоматические пробки.

Их главный недостаток состоит в несоответствии координации время-токовых характеристик (ВТХ) аппарата защиты и кабельно-проводникового изделия.

Поэтому актуальной является задача разработки научно обоснованного метода и, впоследствии, способа его реализации для установления путем моделирования или обработки экспериментальных зависимостей нестационарного нагрева провода (кабеля) прогнозируемого времени допустимой перегрузки t_{off} . То есть необходимо обеспечить соответствующую координацию ВТХ аппарата защиты и кабельно-проводникового изделия.

Анализ последних исследований и публикаций

Известный способ защиты электроустановок сетей жилых, административных и коммерческих зданий основан на нагреве электрическим

током биметаллической пластины, встроенной в АВ. Отключение защищаемого участка сети происходит при превышении изгиба пластины и механическом воздействии на расцепитель АВ [1].

Это достаточно простое по конструкции и широко применяемое устройство имеет следующие недостатки:

- требуется индивидуальный расчет, выбор и настройка измерительного органа под характеристики каждого присоединения сети, что при отсутствии интеллектуализации представляется сложной задачей;

- неучитываемое влияние внешних факторов на изгиб биметаллической пластины приводит к наличию значительной зоны разброса характеристик срабатывания АВ по времени при одном и том же токе;

- при кратностях тока $K=1,20...1,45$ возможны дополнительный недопустимый перегрев провода сети и уменьшение его срока службы, т.к. стандартные АВ, как правило, в таком режиме работы сети нечувствительны.

Анализ возможностей микропроцессорных устройств защиты показывает целесообразность разработки новых принципов обеспечения пожаробезопасности кабелей и электропроводок сетей напряжением 220/380 В, которые позволили бы ускорить отключение аварийного участка, снизить вероятность перегрева, плавления изоляции и дальнейшего КЗ.

Известен способ максимальной токовой защиты (МТЗ) с избирательной чувствительностью к токам удаленных КЗ и пусковым токам асинхронных двигателей АД [2], однако он не может использоваться в режимах перегрузки электрическим током, поскольку не учитывает нагрев проводов сети в зависимости от их пара-

метров. Попытка решить аналогичную задачу применительно к интеллектуальной защите двигателей предпринималась в [3], и в работах [4,5] где использовалась тепловая модель нагрева-охлаждения, а также время-токовая защитная характеристика. Анализ такой защиты показал, что требуется его дальнейшая разработка и переориентация на электрораспределения в сетях с проводами наиболее распространенных типов (ПВС, ШВВП, АППВ, АВВГ, ВВГ, ВВГнг и т. п.), имеющими резиновую или поливинилхлоридную изоляцию сечением 1,5...6 мм².

Цель (задачи) исследования

Целью работы является обоснование способа защиты участка электрической сети от пожароопасных перегрузок, в котором за счет оптимизации контроля защитных время-токовых характеристик и динамики теплового режима провода обеспечивается возможность своевременного отключения этого участка, предотвращения повреждения провода и увеличения срока эксплуатации.

Основной материал исследования

Статистические данные России, Украины и многих других стран, показывают, что среди электротехнических изделий первое место по пожарной опасности занимают кабели и провода – 69,6 % (рис. 1).

Для того чтобы получить тепловую модель нагрева-охлаждения провода (кабеля) электрической сети, необходимо знать время достиже-

ния его изоляцией предельно допустимой температуры нагрева. Согласно [3] предупреждающий сигнал Warning подается микропроцессорным устройством тепловой защиты (МТПЗ), если текущее превышение температуры проводника над температурой окружающей среды $\tau > 1,1 \cdot \tau_{class}$, а сигнал на отключение Danger – при $\tau > 1,4 \cdot \tau_{class}$, где τ_{class} – допустимое превышение температуры для соответствующего класса изоляции. Для изоляции из ПВХ-пластика нагревостойкого $\tau_{class} = 70 \text{ }^\circ\text{C} - \Theta_{o.c.}$, а для ПВХ-пластика не нагревостойкого $\tau_{class} = 60 \text{ }^\circ\text{C} - \Theta_{o.c.}$, где $\Theta_{o.c.}$ – температура окружающей среды.

Нагрев и охлаждение провода (кабеля) является сложным динамическим процессом, который зависит от многих факторов, полный учет которых невозможен. Как показали результаты дальнейшего математического моделирования, в средах Elcut 6.3 и ComsolMultiphysics 5.3a при кратностях тока $K_f \leq 2$ могут с достаточной для практики точностью выполняться следующие допущения:

- температура $\Theta_{o.c.}$ неизменна в течение всего неустановившегося режима;
- плотность: материала проводника $\rho_m = 8900 \text{ кг/м}^3$, изоляции $\rho_{из} = 1400 \text{ кг/м}^3$, воздуха $\rho_g = 1,23 \text{ кг/м}^3$; удельная теплоемкость: проводника $C_m = 400 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$, изоляции $C_{из} = 1600 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$, воздуха $C_g = 1000 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$; теплопроводность: проводника $\lambda_g = 400 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, изоляции $\lambda_{из} = 0,15 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, воздуха $\lambda_g = 0,026 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ – не зависят от времени и температуры тела.

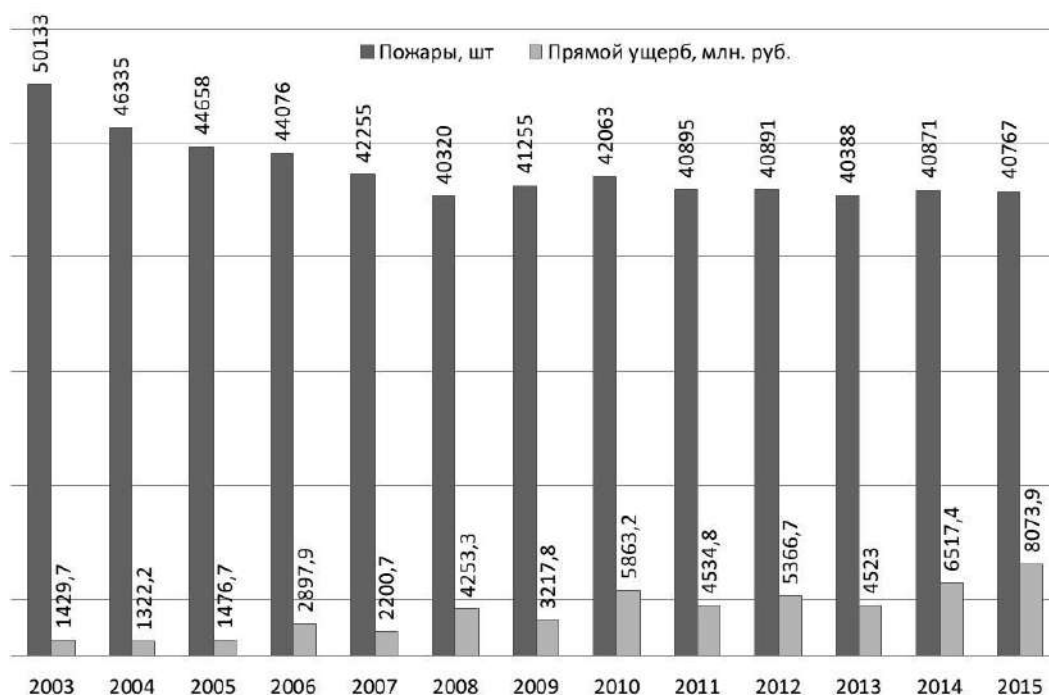


Рис. 1. Статистические данные по пожарам от электрических изделий в России 2003...2015 гг.

Электрическое сопротивление проводника зависит от текущей температуры Θ :

$$\rho(\Theta) = \rho(\Theta_{o.c.}) [1 + 0,0043(\Theta - \Theta_{o.c.})], \quad (1)$$

где $\rho(\Theta_{o.c.}) = 1,72 \cdot 10^{-8}$ Ом·м.

Расчетная зависимость коэффициента теплообмена α характеризуются плотностью теплового потока с поверхности провода (кабеля) в воздух при открытом способе прокладки. Коэффициент теплообмена α обусловлен свободной конвекцией и зависит от перепада температур провода (кабеля) и воздуха, а также размера поверхности охлаждения b :

$$S = \alpha(\Theta_n(b) - \Theta_{o.c.}), \quad (2)$$

где b – размер большой полуоси горизонтально расположенного эллипса.

Математическое моделирование динамики нагрева двухжильного кабеля приведено на примере кабеля ВВГ 2x2,5, сечение которого показано на рис. 2. Его размеры: диаметр медной жилы $2R_w = 1,9$ мм, толщина изоляции $\Delta R_n = 0,8$ мм, толщина оболочки $\Delta R_{об} = 1,4$ мм, размер большой полуоси эллипса $b = 4,9$ мм.

Согласно [6] число Нуссельта в ламинарном и переходном к турбулентному режимам свободной конвекции:

$$Nu = 0,494 \cdot Gr^{1/4}; \quad (3)$$

$$Gr = \frac{g \cdot b^3 \cdot \beta \cdot (\Theta_c - \Theta_{o.c.})}{\nu^2}, \quad (4)$$

где Gr – число Грасгофа; g – ускорение свободного падения, m/c^2 ; b – большая полуось эллипса, м; Θ_c – температура поверхности кабеля, К ($^{\circ}C$); $\Theta_{o.c.}$ – температура окружающей среды, К ($^{\circ}C$); ν – коэффициент кинематической вязкости воздуха, $\nu = 15,06 \cdot 10^{-6}$ m^2/c ; β – температурный коэффициент объемного расширения $\beta = (273 + T_0)^{-1}$.

Тогда по [7] коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{b}. \quad (5)$$

Аппроксимация коэффициента теплоотдачи $\tilde{\alpha}$, Вт/ $m^2 \cdot K$ (рис. 3) проводилась в диапазоне температур $\Delta\Theta = \Theta_c - \Theta_{o.c.} \leq 300$ $^{\circ}C$ выражением:

$$\tilde{\alpha} = F(\Theta) = 3,713 \cdot \ln(\Theta - 293,989) + 0,12. \quad (6)$$

Рассмотрим пример выполнения моделирования в среде ComsolMultiphysics 5.3a для кабеля ВВГ 2x2,5. На рис. 4 представлены скриншоты программы с установленными параметрами материалов кабеля.

Результат расчетов по нагреву двухжильного кабеля ВВГ 2x2,5 показан на рис. 5, а динамика изменения во времени температуры жилы на границе с изоляцией – на рис. 7.

Экспериментальные измерения нагрева жилы кабеля проводились с помощью стенда, принципиальная схема которого представлена на рис. 6. Приборы, используемые в схеме, следующие: автотрансформатор АТСК 25, силовой понижающий трансформатор ТС-10, мультиметр FLUKE 8846A, мультиметр APPA 109N с термпарой.

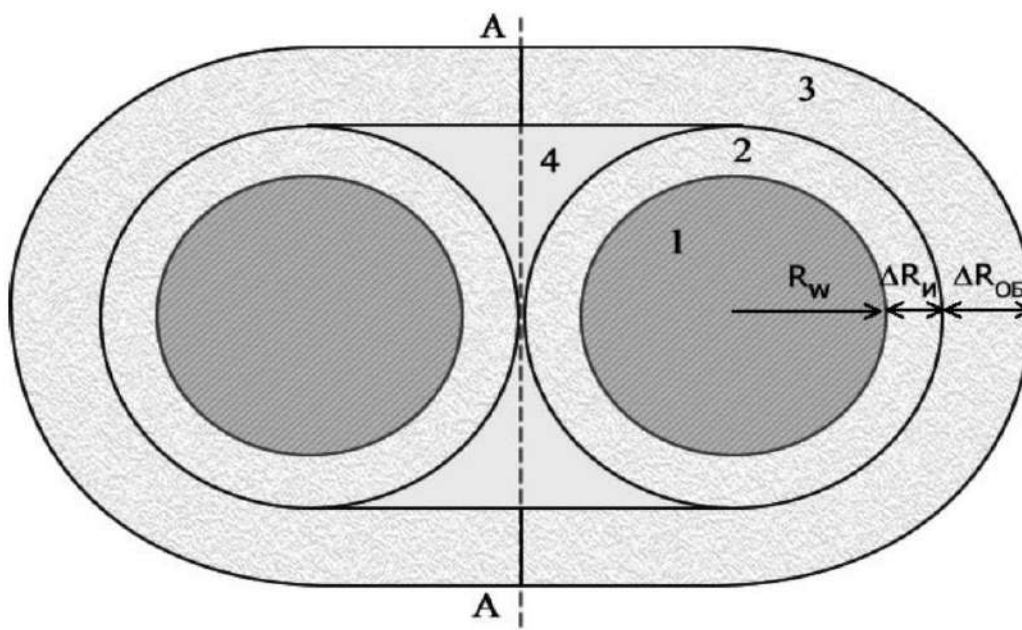


Рис. 2. Сечение кабеля ВВГ 2x2,5

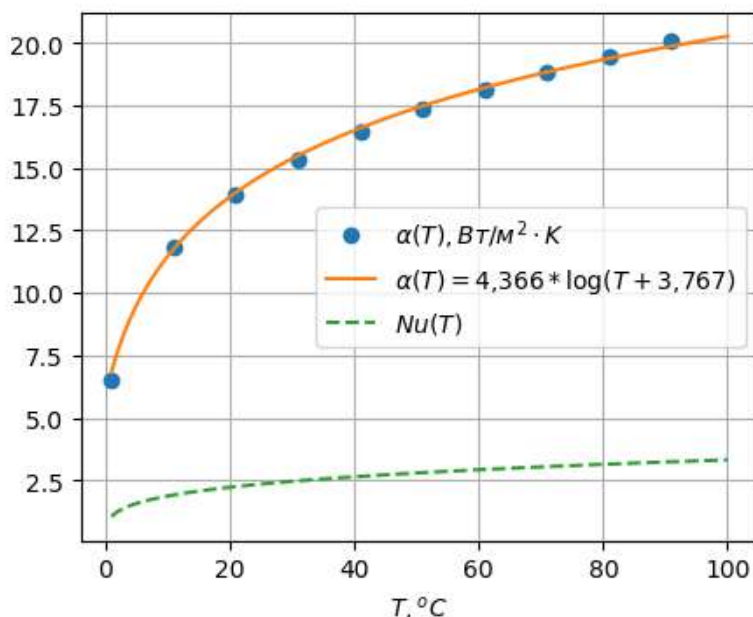


Рис. 3. Число Нуссельта и коэффициент теплоотдачи кабеля ВВГ 2×2,5

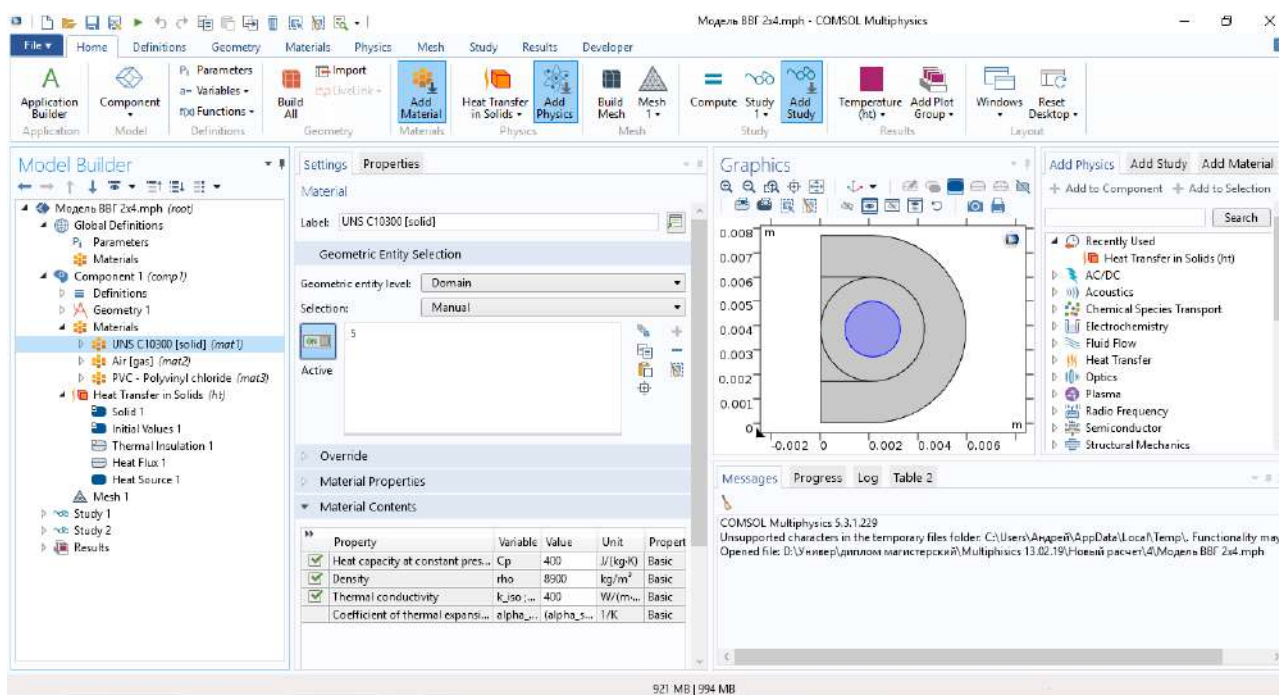


Рис. 4. Окно программы ComsolMultiphysics. Свойства меди

Экспериментальные измерения нагрева жилы кабеля проводились с помощью стенда, принципиальная схема которого представлена на рис. 6. Приборы, используемые в схеме, следующие: автотрансформатор АТСК 25, силовой понижающий трансформатор ТС-10, мультиметр FLUKE 8846A, мультиметр APPA 109N с термопарой.

Результаты численного моделирования процесса нагрева двухжильных кабелей ВВГ 2×2,5 при кратностях тока K_i по отношению к длительно допустимому $I_{дон}=27A$: $K_i=0,5; 1; 1,5; 2$ – показаны на рис. 7а (расчетные данные), при $K_i=2; 3; 4; 5$ – на рис. 7б (данные эксперимента).

Среднее значение температуры нагрева жилы кабеля ВВГ 2×2,5 по трем рядам измерений сравнивались с численным моделированием в аналогичных условиях. Следует подчеркнуть, что здесь наблюдается сходимость $\pm 6\%$ при $K_i < 2$.

При сопоставлении экспериментальных данных нагрева жилы кабеля с результатами численного моделирования для $K_i=3; 4; 5$ наблюдается более значительное расхождение, поэтому при разработке алгоритма микропроцессорной тепловой защиты электрической сети 220/380 В (МПТЗ) в настоящее время взяты результаты

экспериментальных измерений (рис. 7б).

Принципиальная схема устройства, реализующего разработанный способ защиты электрической сети от перегрузок, поясняется на рис. 8.

При инициализации МПТЗ задается исходная информация, которая настраивается в зависимости от типоразмера и условий прокладки провода (кабеля) (табл. 1).

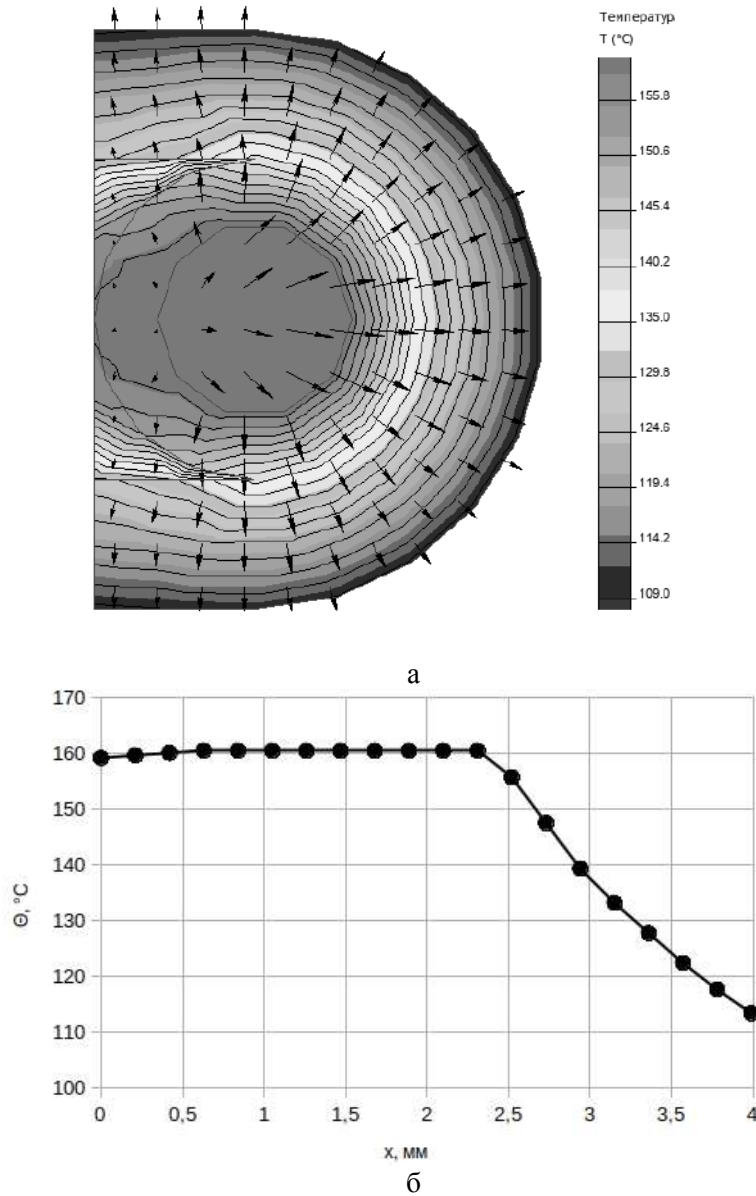


Рис. 5. Результаты моделирования нагрева провода в программе Elcut 6.3 при токе $I = 54$ А и температуре воздуха $\Theta_{a.c.} = 20$ °С:
 а – изолинии температуры; б – изменение температуры вдоль координаты x

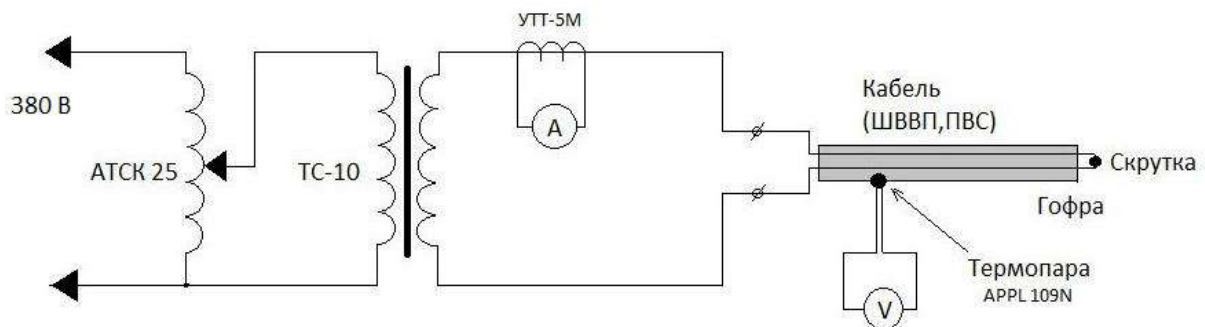


Рис. 6. Принципиальная схема экспериментального стенда для определения интервалов времени до плавления ПВХ-изоляции кабельных изделий

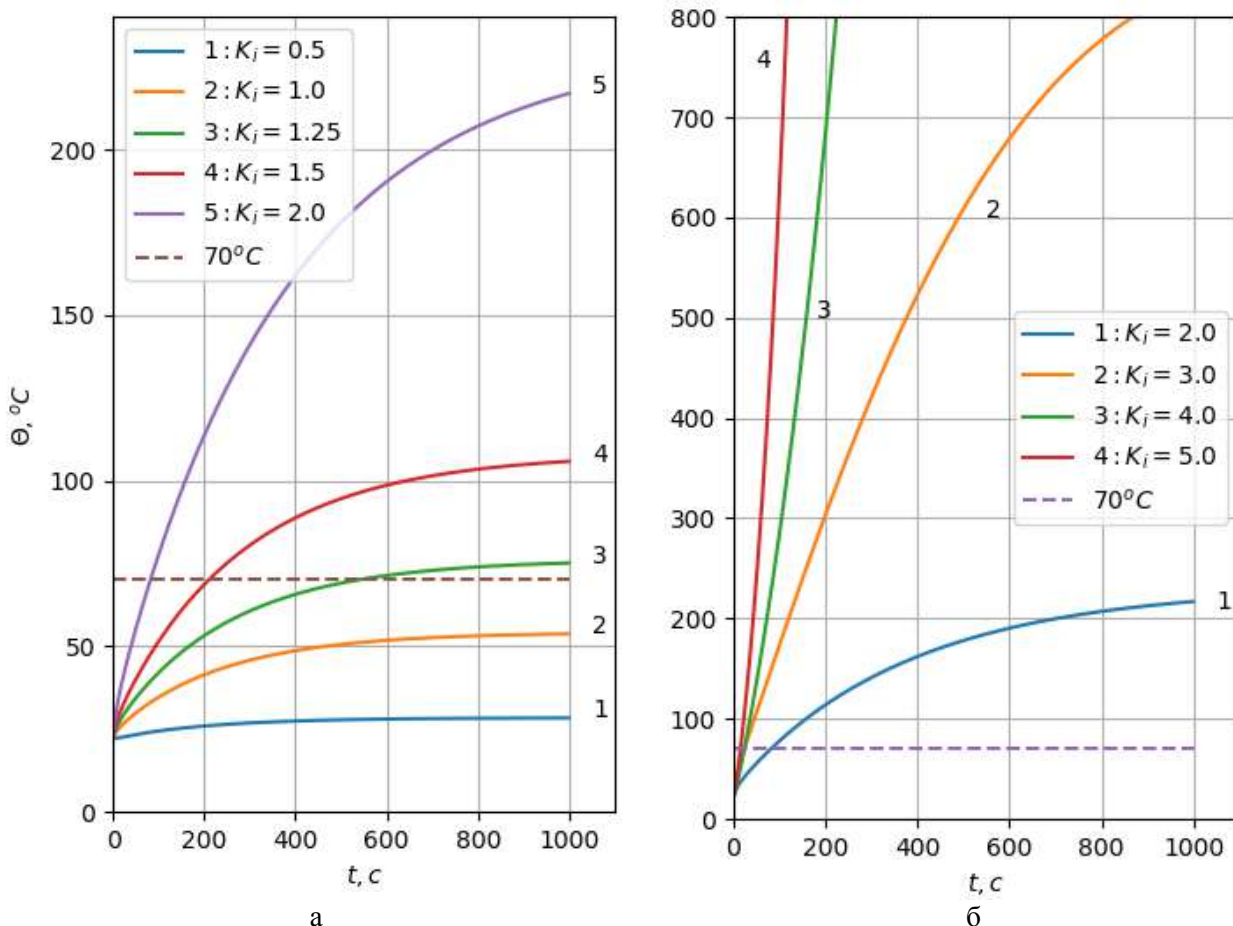


Рис. 7. Зависимости температуры поверхности кабеля от кратности тока перегрузки: а – согласно расчету; б – согласно эксперименту

Табл. 1. Типоразмер и условия прокладки провода (кабеля)

Типоразмер	Материал защищаемого провода / сечение, мм ²	Уставка МПТЗ, А		
		n=1	n=2	n=3
I	Медь/1,5	23	18	15
II	Медь/2,5	30	25	21
III	Медь/4	41	32	27
I	Алюминий/2,5	24	19	16
II	Алюминий/4	32	25	21
III	Алюминий/6	39	31	26

В табл. 1: n=1 – открытая прокладка, n=2 – 2-жильный провод в трубе; n=3 – 3-жильный провод в трубе; $\Theta_{o.c.}$ – температура окружающей среды, соответствующая характеристикам нагрева провода из холодного состояния; $\Theta_{off}=70\text{ }^{\circ}\text{C}$ – максимально допустимая температура нагрева провода данного класса изоляции E; из чего следует, что максимально допустимая температура перегрева провода $\tau_{off}=\Theta_{off}-\Theta_{o.c.}=70-\Theta_{o.c.},\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В каждом из проводов, подключенных к аппарату защиты 1-фазной электрической сети (фазном и нейтральном), или только в фазном проводе выполняют измерение токов (рис. 8,

датчик тока U2) и их аналогово-цифровое преобразование в дискретные значения $i_{ph,j}$ (микроконтроллер U1, порт PA1), затем определяют действующие значения тока I_{ph} методом интегрирования квадратов дискретных значений $i_{ph,j}^2$ и определяют коэффициент, равный отношению значения тока I_{ph} и тока уставки тепловой защиты $I_{\Theta i}$ как $K_i=I_{ph}/I_{\Theta i}$.

Измерение $i(t)$ производят в течение 3-х периодов промышленной частоты $3T=60\text{ мс}$, при этом за один период $T_1=20\text{ мс}$ может выполняться до 10-ти измерений с интервалом 2 мс.

В табл. 1 представлены допустимые значения токов проводов с алюминиевой и медной жилами сечением 1,5...6 мм² для различных условий прокладки $I_{\Theta 1}, I_{\Theta 2}, I_{\Theta 3}$.

По предложенным зависимостям находят установившийся перегрев провода $\tau_{ycm},\text{ }^{\circ}\text{C}$, и постоянную времени нагрева (охлаждения) T_1 в зависимости от K_i .

Затем определяют текущий перегрев провода:

$$\tau_{i+1} = \tau_{ycm} - (\tau_{ycm} - \tau_i) \cdot \exp\left(\frac{-\Delta t}{T_1}\right), \quad (7)$$

и прогнозируемое время допустимой перегрузки:

$$t_{off} = -T_1 \cdot \ln \left(\frac{\tau_{ycm} - \tau_{off}}{\tau_{ycm} - \tau} \right), \quad (8)$$

где i – шаг алгоритма; τ_i – текущий перегрев провода на предыдущем шаге дискретизации по времени, запись которого производится в память, °С, Δt – шаг дискретизации по времени, с, τ_{off} – максимально допустимый перегрев провода, °С.

Далее прогнозируемое время допустимой перегрузки t_{off} сравнивают с допустимым временем отключения T_{off} (время действия исполнительного механизма с учетом запаса $\approx 0,4$ с), и при $t_{off} \leq T_{off}$ производится автоматическое отключение защищаемого участка сети, а при $t_{off} > T_{off}$ прогнозируемое время допустимой перегрузки t_{off} сравнивают с временем предупреждения T_{warn} (> 20 с) и, если $t_{off} \leq T_{warn}$, подают предупреждающий сигнал о возможности повреждения провода (кабеля).

Установившийся перегрев провода определяется зависимостью $\tau_{ycm} = \tau_{\Theta} \cdot K_i^2$, где τ_{Θ} – устано-

вившийся перегрев провода при $K_i = 1^\circ\text{C}$.

Отдельные вычислительные и логические операции, которые выполняет МПТЗ, реализуются программно.

Рассмотрим особенности применения полученной защитной характеристики МПТЗ для наиболее широко используемых в электроустановках сетей жилых, административных и коммерческих зданий кабельно-проводниковых изделий типов ПВС (аналогичны ВВГ), ШВВП, АВВГ, АППВ. Они отличаются конструкцией (плоские, круглые), толщиной и составом изоляции. В частности, провод ШВВП с 1-слойной изоляцией имеет меньшую постоянную времени нагрева и требует применения дополнительной защитной характеристики. Необходимо учесть и разброс в данных измерений температуры жил, вызванный особенностями проведения экспериментов (рис. 9).

Для устранения этих погрешностей защитной характеристики предлагается в выражениях (7), (8) учитывать коэффициент запаса $K_3 = 1,2$ или $1,4$ и находить установившийся перегрев провода как τ_{ycm}/K_3 , а постоянную времени нагрева (охлаждения) как $T_1 \cdot K_3$.

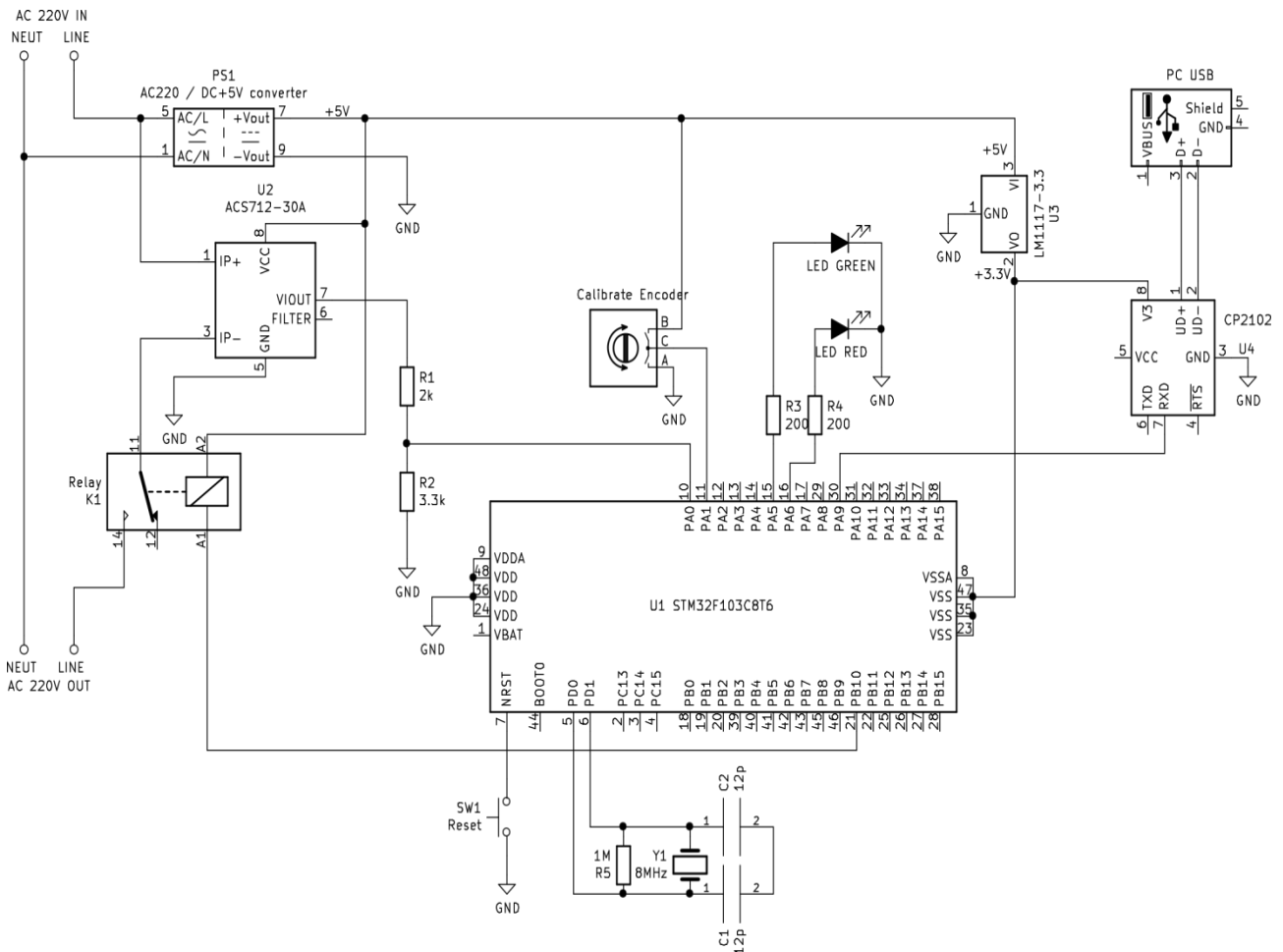


Рис. 8. Принципиальная схема МПТЗv1.0

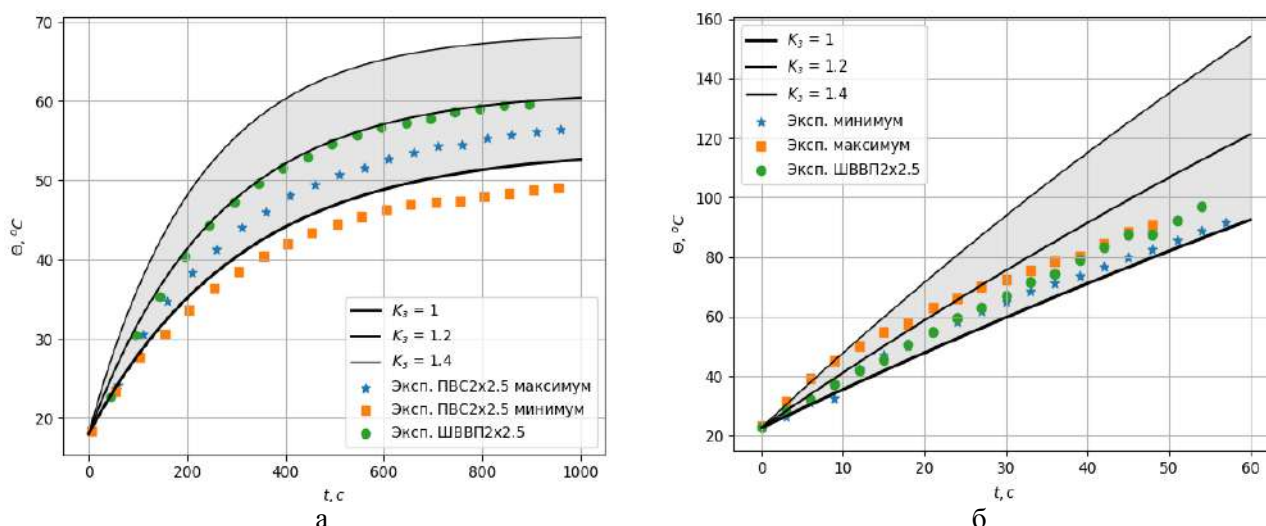


Рис. 9. Корректировка защитных характеристик МПТЗ для 2-жильных медных проводов сечением 2,5 мм²:
 а – $K_i=1$; б – $K_i=3$

МПТЗ при работе по приведенному алгоритму формирует новые, более совершенные, по сравнению с существующими, защитные характеристики электрических сетей жилых, административных и коммерческих зданий в режиме токовой перегрузки и при замыканиях через переходное сопротивление или сопротивление электрической дуги.

Выводы

С помощью численного моделирования в программных средах Elcut 6.3, ComsolMultiphysics 5.3a и экспериментальных измерений получены характеристики динамики нагрева электрическим током двухжильного изолированного кабеля ВВГ 2×2,5 с 2-слойной изоляцией, охлаждаемого в результате свободно-конвективного теплообмена с окружающим воздухом с коэффициентом $Ra=5 \cdot 10^4$ (открытый способ прокладки).

Сопоставление расчетов, выполненных методом конечных элементов в указанных программных средах, с данными экспериментов показывает соответствие с расчетами на уровне $\pm 6\%$ при кратности тока по отношению к длительно допустимому $K_i=0,5...2$.

Для предотвращения пожароопасного действия режима перегрузки электрическим током в электропроводах 220 В и увеличения срока эксплуатации предлагается за счет оптимизации контроля ВТХ и динамики теплового режима провода обеспечить возможность корректного и своевременного отключения защищаемого участка сети.

Широко используемые кабельно-проводниковые изделия типов ПВС (аналогичны ВВГ),

ШВВП, АВВГ, АППВ имеют конструктивные отличия, поэтому их постоянные времени нагрева и установившиеся температуры нагрева подвержены разбросу. Предложенный способ корректировки защитной характеристики МПТЗ, учитывающий рекомендованный коэффициент запаса K_3 , позволяет полностью превзойти зону разброса температурных характеристик нагрева проводов во времени.

Список литературы

1. Электротехнический справочник. Электротехнические изделия и устройства / Под общ. ред. профессоров МЭИ В.Г. Герасимова и др. – М.: Энергоатомиздат, 2003. Т.2. – С. 359-363.
2. Пат. на винахід 114380 Україна, МПК(2006) H02H 3/08, МПК(2006) H02H 7/00, МПК(2006) H01H 73/02. Спосіб максимального струмового захисту з вибірковою чутливістю до струмів віддалених коротких замикань та пускових струмів асинхронних електродвигунів / Кобозев О.С., Серета О.Г., Агабабов А.Ю., Юхно О.Д. – № а 2016 05401; заявл. 18.05.16; опубл. 25.05.17; бюл. №10.
3. Арещенко, Б.В. Разработка алгоритмов устройств интеллектуальной защиты двигателей // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2008. – №1(17). – С. 100-106.
4. Kotb, M.F. Over Current Protection Relay Using Arduino Uno for Future Renewable Electric Energy Delivery and Management (FREEDM) System / M.F. Kotb, M. El-Saadawi, E.H. El-Desouky // Eur. J. Electr. Eng. Comput. Sci. – 2018. – No.5. Vol.2. – P. 38-44.

5. Design and Construction of a Numerical over Current Relay / MD Rayhanul Amin Rumi et al. // A Thesis Submitted to the EEE Department of BRAC University. – Bangladesh: BRAC University, 2015. – 44 p.
6. Аушев, И.Ю. Предотвращение пожароопасного действия электрического тока в электропроводах напряжением 220 В // Вестник командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2013. – №2(18). – С. 73-80.
7. Аушев, И.Ю. Динамика нагрева многожильного изолированного проводника электрическим током / И.Ю. Аушев, Ю.А. Станкевич, К.Л. Степанов // Вестник командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2012. – №2(16). – С. 87-96.

I.A. Bershadskiy /Dr. Sci. (Eng.)/, A.V. Zgarbul, A.A. Kulish
Donetsk National Technical University (Donetsk)

SUBSTANTIATION OF THE METHOD FOR OVERLOAD PROTECTION OF VOLTAGE 220 V ELECTRIC NETWORKS TAKING INTO ACCOUNT THE NONSTATIONARY HEATING OF THE WIRING

***Background.** Insufficient coordination of the time-current characteristics of the protection device and the cable leads to a fire situation in the electrical network of 220 V. A mathematical model is developed for heat transfer of 2-core open laying cable based on the equations of convective heat transfer (Fourier-Newton). A comparative analysis of the obtained results and the data of experimental thermal studies of VVG 2x2.5 cable performed.*

***Materials and/or methods.** The method for protecting the electrical distribution network from overload currents based on determining the current overheating of the cable in the dynamic load mode, taking into account changes in the parameters of the thermal model. The heating time of the wire constant and the steady heating of the wire set depending on the multiplicity of the overload current.*

***Results.** The simulation results compared with experimental data. The maximum value of the relative error of heating the cable core is $\Delta = \pm 6\%$ in the modes of current overloads, not exceeding twice the permissible for the cable. New protective characteristics of electrical wiring formed based on the thermal heating model and the parameters of the model determined.*

***Conclusion.** The presented calculation method is generally correct in the given operating conditions of the electric network. In other cases, experimental characteristics used. A method for protecting the electrical distribution network from overload currents implemented on a microprocessor protective device.*

***Keywords:** wiring, heating, overload, thermal protection, microprocessor device.*

Сведения об авторах

И.А. Бершадский

SPIN-код: 4772-3504
 ORCID iD: 0000-0001-7383-3415
 Телефон: +380 (71) 414-28-12
 Эл. почта: ibersh164@gmail.com

А.А. Кулиш

Телефон: +380 (71) 358-84-32
 Эл. почта: kul.andr.aleks@gmail.com

А.В. Згарбул

Телефон: +380 (71) 465-02-28
 Эл. почта: zgarbul.andrey@gmail.com

*Статья поступила 29.05.2019 г.
 © И.А. Бершадский, А.В. Згарбул, А.А. Кулиш, 2019
 Рецензент д.т.н., проф. Э.Г. Куренный*