

УДК 621.316.9

## ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ПОЖАРООПАСНОГО ДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА В ЭЛЕКТРОПРОВОДКАХ НАПРЯЖЕНИЕМ 220 В

Аушев И.Ю., к.т.н.

Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь

e-mail: asb@kii.gov.by

*Определена зависимость времени нагрева изоляции многожильного проводника до предельно допустимой температуры от протекающего тока. Разработана методика выбора аппаратов защиты электропроводок, которая основана на сопоставлении времятоковых характеристик аппаратов защиты и кабельных изделий и использовании полученной зависимости времени нагрева кабельного изделия от протекающего тока.*

*The dependence of the heating time of insulation for stranded conductor up to the maximum allowable temperature by electrical current has been determined. A method for selecting protection of the electric wiring devices, which is based on a comparison of time-current characteristics of protective devices and cable products and use the resulting dependence for the heating cable products on the flowing current, has been developed.*

(Поступила в редакцию 15 июля 2013 г.)

### ВВЕДЕНИЕ

Безопасная эксплуатация промышленных и строительных предприятий, общественных и жилых зданий во многом зависит от эффективной работы аппаратов защиты по обеспечению пожарной безопасности кабельных изделий. Существующий выбор аппаратов защиты не учитывает разброс времени отключения кабельного изделия аппаратами защиты различных серий и фирм-производителей, и, как следствие, температуру нагрева кабельного изделия в момент его отключения. Это приводит к перегреву изоляции проводников выше предельно допустимых температур и развитию пожароопасной ситуации, о чем свидетельствуют статистические данные о пожарах, которые возникли из-за повреждения кабельных изделий. В Республике Беларусь, как и других странах, более 17% пожаров возникает именно по этим причинам. Только за 2012 год в республике из-за перегрузок и коротких замыканий в проводах и кабелях произошло 962 пожара, что составляет около 60 % от общего числа пожаров, причиной которых послужила неисправность электротехнических изделий. При этом погибло 15 человек. Общий экономический ущерб превысил 17 млрд. рублей.

В связи с этим разработана научно обоснованная методика выбора аппаратов защиты, направленной на предотвращение пожароопасного действия электрического тока, является актуальной задачей.

### ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Из литературных источников [1,2] известно, что защиту кабельных изделий от пожароопасного перегрева при перегрузках и коротких замыканиях возможно осуществить лишь при соответствующей координации времятоковых характеристик (ВТХ) аппарата защиты и кабельного изделия. Принцип совмещения ВТХ при построении защиты кабельной линии от воспламенения изоляции проверен экспериментальными исследованиями, проведенными Г.И. Смелковым и А.В. Масловым [3,4]. В опубликованных ими работах, отмечено, что полученные экспериментальные ВТХ кабелей хорошо коррелируют с

взаимным расположением ВТХ аппаратов защиты. При этом указывается, что значительным недостатком данного метода защиты кабельных изделий, является отсутствие ВТХ кабельных изделий в справочной литературе и технической документации производителей.

Для того, чтобы воспользоваться методом совмещения ВТХ необходимо знать время достижения изоляцией кабельного изделия предельно допустимой температуры нагрева. В представленной работе получены соотношения для расчета времени нагрева многожильного кабеля в зависимости от значения протекающего тока. Соответствующее уравнение сохранения энергии, которое учитывает джоулев нагрев проводника и его охлаждение за счет теплообмена с внешней средой, имеет вид [5]:

$$\rho_{\text{п}} c_{\text{рп}} \frac{\partial T}{\partial t} = -\text{div } \vec{J} + Q, \quad \vec{J} = -\lambda_{\text{п}} \nabla T, \quad Q = \frac{\rho I^2}{S_w^2}, \quad (1)$$

где  $\rho_{\text{п}}$  – плотность материала проводника, кг/м<sup>3</sup>;

$c_{\text{рп}}$  – удельная теплоемкость материала проводника при постоянном давлении, Дж/(кг·К);

$T$  – температура, К;

$t$  – время, с;

$J$  – плотность потока тепла, обусловленного теплопроводностью, Вт/м<sup>2</sup>;

$Q$  – объемная мощность нагрева проводника электрическим током, Вт/м<sup>3</sup>;

$\lambda_{\text{п}}$  – коэффициент теплопроводности материала проводника, Вт/(м·К);

$\rho$  – удельное электрическое сопротивление материала проводника, Ом·м;

$I$  – сила тока, А;

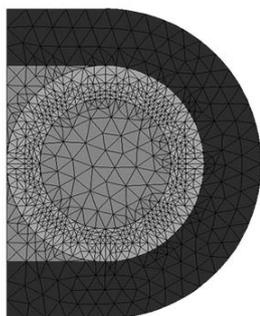
$S_w$  – площадь сечения жилы, м<sup>2</sup>.

Граничные условия следующие: на оси проводника в силу симметрии тепловой поток должен обращаться в нуль; на границе проводника с изоляцией должны выполняться условия равенства их температур, а также непрерывности теплового потока; конвективный теплообмен с поверхности оболочки описывается эмпирическим уравнением Ньютона, при этом учтен теплообмен излучением. Начальное условие состоит в том, что в момент включения тока температура кабеля везде одинакова и равна температуре окружающей среды.

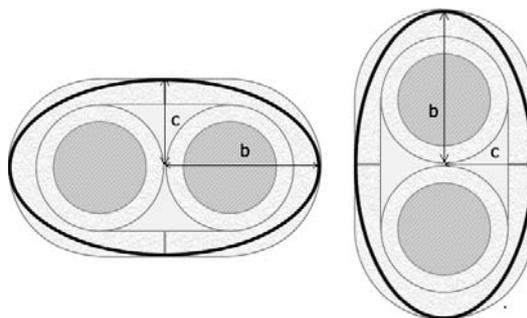
В общем случае задача о нестационарном нагреве кабельного изделия с учетом зависимости от температуры удельного сопротивления проводника и теплофизических свойств материалов кабеля, а также нелинейности, связанной с теплообменом кабеля с внешней средой, не может быть решена аналитически. Поэтому естественно решать данную задачу численными методами. Для этого использовалась компьютерная программа FlexPDE [6], основанная на методе конечных элементов. Она предназначена для моделирования различных физических задач, описываемых нелинейными дифференциальными уравнениями в частных производных в одномерном, двумерном и трехмерном случаях по сценариям, написанным пользователем. Конечно-элементная сетка для расчета двумерной задачи нагрева двухжильного кабеля приведена на рис. 1.

В силу симметрии данной задачи температурное поле находится для половины кабеля. На линии симметрии, которой является левая вертикаль, нормальная компонента теплового потока должна быть равна нулю. В работе [7] изучена динамика нагрева двухжильного кабеля, однако, разработанные методы моделирования и полученные зависимости можно использовать для кабелей других конструкций. В зависимости от ориентации большой оси двухжильного кабеля эллипсоидного сечения различают горизонтально и вертикально расположенные кабели (рис. 2). Для них условия

конвективного теплообмена различны. Расчеты показали, что конвективный теплообмен горизонтально расположенного кабеля эллипсоидного сечения более чем на 20% ниже, чем у вертикально расположенного. Поэтому дальнейшие исследования выполнены для горизонтально ориентированного двухжильного кабеля, время нагрева которого минимально. Моделирование нестационарного нагрева двухжильных кабелей проводилось с учетом зависимости теплофизических свойств материалов от температуры и нелинейности условий свободно-конвективного и радиационного теплообмена с окружающей средой.



**Рисунок 1 – Конечно-элементная сетка для двухжильного кабеля**



**Рисунок 2 – Ориентация двухжильного кабеля в пространстве**

Для оценки наиболее неблагоприятных условий охлаждения кабеля при его эксплуатации было проведено сравнение нагрева кабеля, окруженного воздухом и бетоном. Результаты расчета показали, что температура жилы всегда больше у кабеля, находящегося в воздухе, нежели в бетоне. Причем в условиях установившегося режима теплопередачи отношение температур жилы кабеля, расположенного в воздухе и бетоне, при двукратной перегрузке превышает 2 раза, что связано с более высокой теплопроводностью и теплоемкостью бетона. Это же подтверждают и экспериментальные данные. Таким образом, наиболее пожароопасной оказывается эксплуатация кабелей, окруженных воздухом.

Тестирование численной модели для двумерных расчетов проводилась путем сравнения результатов ее использования для одномерных стационарных задач (цилиндрический одножильный кабель), где в ряде случаев существует аналитическое решение.

На рис. 3 и 4 показано сравнение расчетных (сплошные линии) и экспериментальных данных (точки) для нагрева двухжильных кабелей токами, превышающими их номинальные значения.

Анализ показывает, что нагрев медной и алюминиевой жил, а также оболочки при номинальных значениях токов практически совпадает (рис. 5). Близки оказываются и времена нагрева кабелей с медной и алюминиевой жилами до предельно допустимых температур в условиях перегрузки (рис. 6). Из расчетов следует, что динамика нагрева двухжильных кабелей с жилами из различных материалов при соответствующих токах является подобной.

Для обобщения времени перегрева кабелей с различными материалами жил и разной величиной тока естественно перейти к безразмерному времени нагрева, определив его как отношение реального времени перегрева  $t$  к минимальному времени нагрева теплоизолированного проводника  $t_0$ , которое можно оценить по уравнению (1), если положить поток тепла, равным нулю. Сравнение безразмерного времени нагрева кабелей разных типов с жилами из различных материалов в широком диапазоне токов показывает, что соответствующие зависимости являются универсальными (рис. 7).

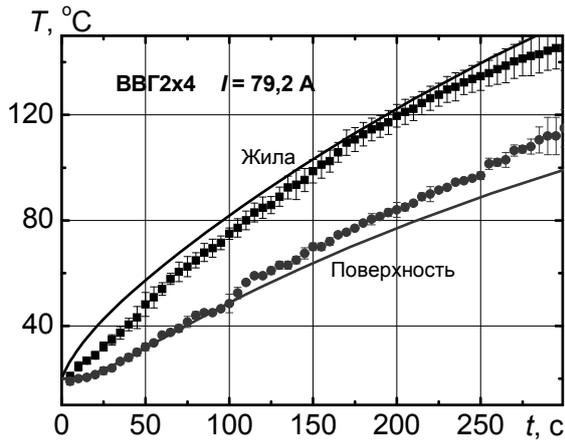


Рисунок 3 – Динамика нагрева двухжильного кабеля в зависимости от величины протекающего тока

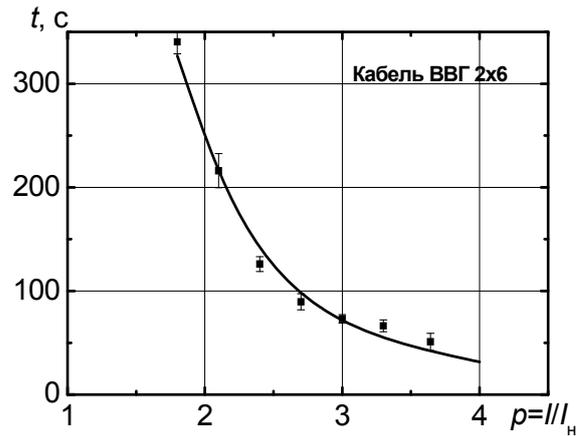


Рисунок 4 – Зависимость времени достижения жилой предельной температуры от перегрузки

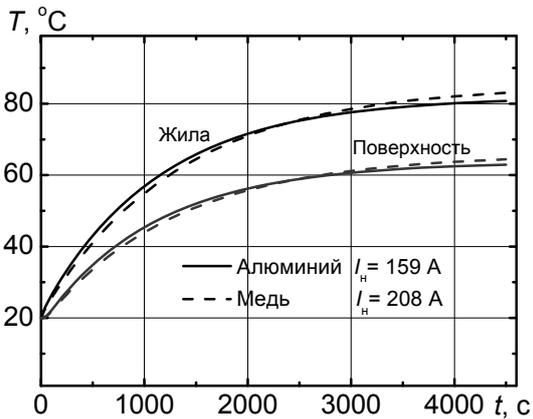


Рисунок 5 – Динамика нагрева жилы сечением 50 мм<sup>2</sup> из меди и алюминия и внешней поверхности кабеля

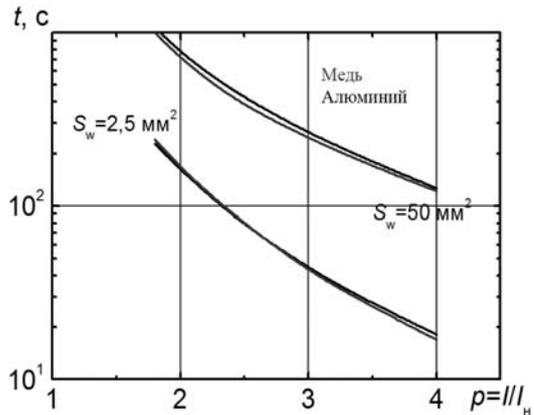


Рисунок 6 – Зависимость времени достижения жилой предельной температуры от перегрузки

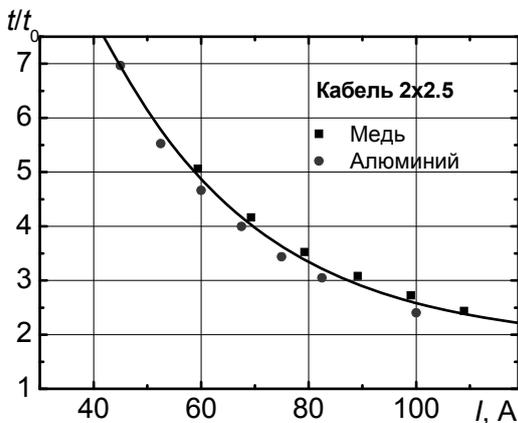
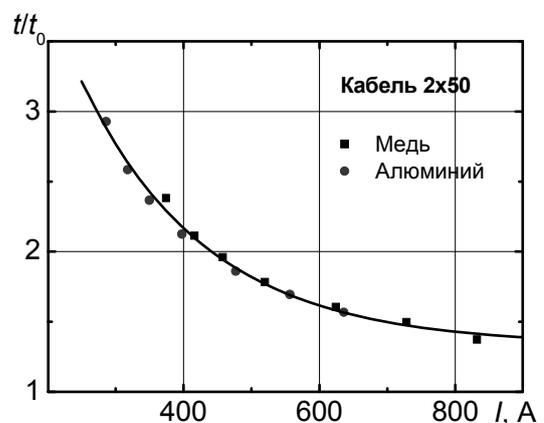


Рисунок 7 – Зависимость безразмерного времени достижения жилой предельно допустимой температуры от величины тока



Фактическое время перегрева до заданной температуры можно аппроксимировать следующим выражением:

$$t = t_0 \cdot (P_1 + P_2 \exp(-I / P_3)), \quad t_0 = \frac{\rho_{\text{П}} \cdot c_{\text{ПП}} \cdot \Delta T \cdot S_w^2}{\rho \cdot I^2}. \quad (2)$$

Найденные зависимости (2) позволяют рассчитать минимальное время перегрева кабеля до заданной температуры, зависящее от протекающего тока и параметров кабеля для наиболее неблагоприятных условий охлаждения, а также построить времятоковые характеристики двухжильных кабелей с различным материалом токоведущих жил.

Используя разработанный метод численного моделирования динамики нагрева двухжильного кабеля, можно рассчитать значения коэффициентов для кабельных изделий другой конструкции, не проводя дополнительных экспериментальных исследований, что является актуальной задачей в практике проектирования электрических сетей.

Значения рассчитанных коэффициентов  $P_1, P_2, P_3$  для всей номенклатуры двухжильных кабелей с ПВХ изоляцией приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения коэффициентов  $P_1, P_2, P_3$

Сечение жилы кабеля, мм <sup>2</sup>	$P_1$	$P_2$	$P_3$	Погрешность, %
1,5	1,920	31,17	17,39	2,8
2,5	1,733	23,31	26,58	2,2
4	1,644	17,61	41,33	1,2
6	1,567	13,26	53,68	1,3
10	1,474	12,35	76,27	1,1
16	1,418	9,99	98,47	1,1
25	1,405	9,46	123,0	0,6
35	1,361	9,06	142,8	0,6
50	1,333	7,28	184,7	0,5

Для оценки адекватности полученной зависимости были проведены экспериментальные исследования по определению индивидуальных ВТХ однополюсных автоматических выключателей бытового назначения серии АВ47-29 и ВТХ кабельных изделий [8, 9].

Для проверки условия обеспечения пожарной безопасности кабельных изделий марок ВВГ2×1,5, ВВГ2×2,5, ВВГ2×4 и ВВГ2×6 аппаратами защиты, которые по требованиям ТНПА подходят для защиты кабелей указанных марок, выполнено совмещение ВТХ, построенных по паспортным данным, произвольно взятых 20 аппаратов защиты с теоретически рассчитанными ВТХ кабелей. По их взаимному расположению можно судить о возможности обеспечения пожарной безопасности защищаемых кабелей любыми автоматическими выключателями выбранной серии и фирмы-производителя. Однако, анализ совмещенных графиков показал, что в 59,2 % случаев ВТХ кабелей попадали в зону неопределенности (разброса) ВТХ аппаратов защиты. В этих случаях защита кабелей носит вероятностный характер, который зависит от индивидуальной ВТХ аппарата защиты выбранной серии и фирмы-производителя.

Для оценки надежности защиты испытанных кабельных изделий проведено совмещение индивидуальных ВТХ автоматических выключателей, определенных экспериментально, с расчетными ВТХ кабелей. На рис. 8 и 9 представлены расчетные ВТХ кабельных изделий и аппроксимированные индивидуальные ВТХ аппаратов защиты. Из анализа совмещенных ВТХ следует, что автоматические выключатели фирмы ИЭК с

номинальным током расцепителя 16 А (рис. 8) не обеспечивает пожарную безопасность кабеля ВВГ2×1,5 при кратностях сверхтока до 2,6  $I_n$ , т. к. ВТХ кабеля располагается ниже (левее) индивидуальной ВТХ автоматического выключателя. Следовательно, кабель нагреется до предельно допустимой температуры раньше, чем отключится автоматический выключатель. Автоматические выключатели фирмы Moeller (рис. 9) с номинальным током расцепителя 20 А не обеспечивают защиту кабеля ВВГ2×1,5 на всем участке сверхтоков, а также кабеля ВВГ2×2,5 при кратностях сверхтока до 1,9  $I_n$ . Защита кабеля ВВГ2×1,5 не обеспечивается автоматическими выключателями фирмы Полюс при кратности сверхтока до 1,8  $I_n$  (рис. 9). В случае выбора аппаратов защиты по ТНПА, все автоматические выключатели любой фирмы-производителя с номинальным током расцепителей 16 и 20 А, представленные на рис. 8 и 9, подходят для защиты кабелей ВВГ2×1,5 и ВВГ2×2,5. Однако, сравнение их ВТХ указывает на то, что не все аппараты защиты, выбранные только на основании ТНПА, обеспечивают пожарную безопасность кабельных изделий. Это свидетельствует о недостаточности требований, изложенных в ТНПА, с точки зрения предотвращения пожароопасного действия электрического тока в кабельных изделиях. Защита во многом зависит от индивидуальной ВТХ аппарата защиты, а так же фирмы-производителя электрического аппарата.

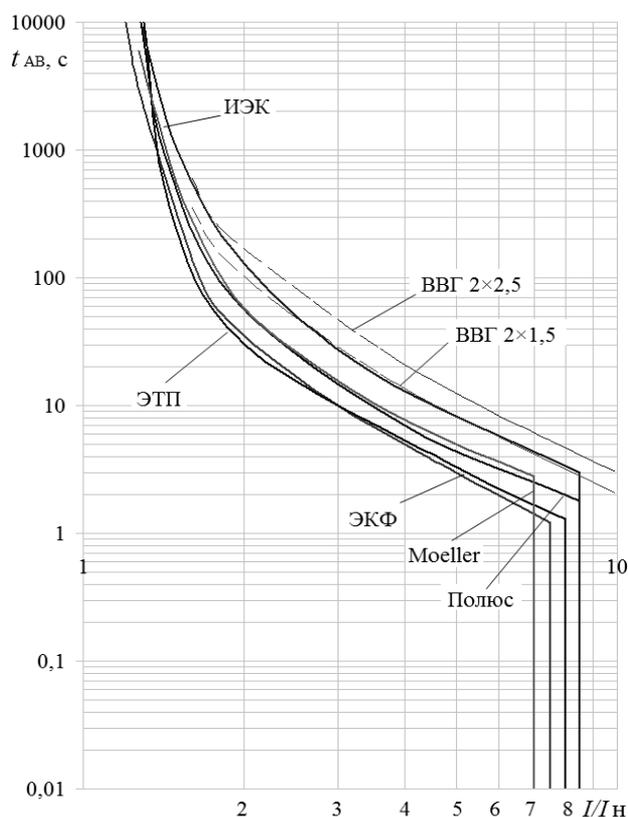


Рисунок 8 – Совмещенный график ВТХ АВ разных производителей (16 А) и кабельных изделий

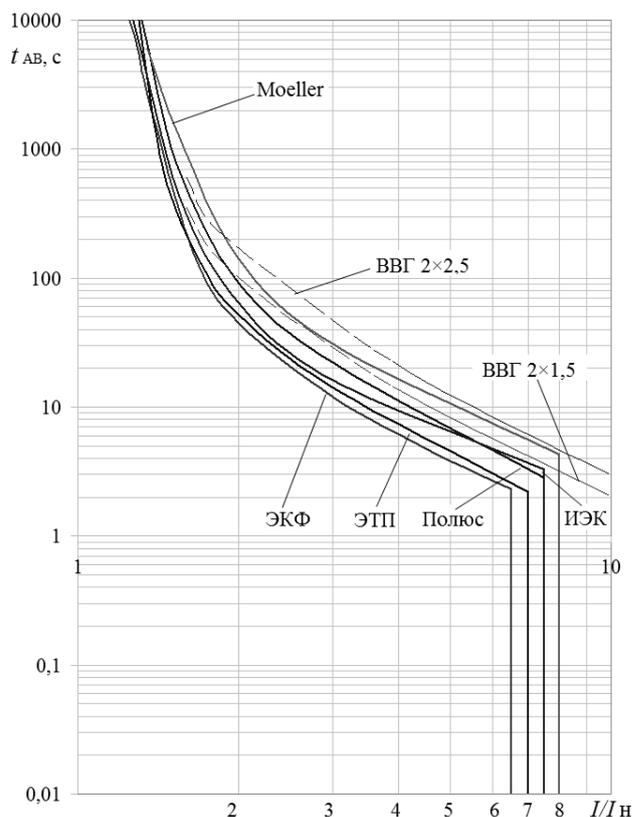


Рисунок 9 – Совмещенный график ВТХ АВ разных производителей (20 А) и кабельных изделий

На основании проведенных исследований разработана методика выбора аппаратов защиты, заключающаяся в следующем: на первом этапе по ТНПА проводится предварительный выбор марок проводника и технических характеристик аппарата защиты, который зависит от вида защищаемой нагрузки и расчетных параметров электрической сети. На втором этапе выполняется проверка правильности выбора аппарата защиты, надежности и эффективности защиты кабельного изделия от аварийного режима по условию обеспечения пожарной безопасности.

Проверка выбранного аппарата защиты проводится путем совмещения его ВТХ с ВТХ кабельного изделия. ВТХ кабельного изделия рассчитывается по разработанной зависимости времени нагрева изоляции до предельно допустимой температуры от протекающего тока и должна располагаться выше (правее) ВТХ выбранной серии аппарата защиты во всем диапазоне сверхтоков. Для этого с использованием, например, программного средства Excel строится паспортная ВТХ выбранной серии аппарата защиты по имеющимся в паспортах или каталогах значениям зависимости времени отключения от кратности сверхтока.

После совмещения в единой логарифмической системе координат паспортной ВТХ аппарата защиты выбранной серии и ВТХ кабельного изделия возможно три варианта их взаимного расположения:

1. В случае расположения ВТХ кабельного изделия выше (правее) верхнего значения полосы разброса паспортной ВТХ аппарата защиты во всем диапазоне, пожарная безопасность кабельного изделия обеспечивается, т.к. аппарат защиты разомкнет защищаемую цепь раньше, чем температура нагрева изоляции кабельного изделия достигнет предельно допустимого значения. Следовательно, любой аппарат защиты выбранной серии подходит для защиты кабельного изделия от аварийного режима.

2. При расположении ВТХ кабельного изделия ниже (левее) нижнего значения полосы разброса, устанавливаемого для заданной серии аппаратов защиты, время полного отключения аппарата защиты больше времени достижения кабельным изделием предельно допустимой температуры нагрева. В таком случае условие безопасной эксплуатации не выполняется и следует отказаться от ранее выбранной серии аппарата защиты и подобрать другую серию.

Если ВТХ защищаемого кабельного изделия располагается в полосе разброса (неопределенности) ВТХ аппарата защиты во всем диапазоне сверхтоков или его части, то защита кабельного изделия будет зависеть от индивидуальной ВТХ аппарата защиты. Для этого необходимо построить индивидуальную ВТХ аппарата защиты выбранной серии и фирмы-производителя, сопоставить ее с ВТХ защищаемого кабельного изделия и проверить выполнение условия безопасной эксплуатации кабельного изделия. Индивидуальную ВТХ аппарата защиты можно определить по результатам входного контроля.

Использование разработанной методики выбора аппаратов защиты необходимо для проверки выполнения условия обеспечения пожарной безопасности кабельных изделий, что позволит предотвратить пожароопасное действие электрического тока за счет своевременного отключения кабельного изделия в условиях аварийного режима.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Найдена зависимость времени нагрева изоляции кабеля до предельно допустимой температуры от величины протекающего тока. Показано, что время достижения предельно допустимых температур кабелей с различными материалами жилы можно представить универсальной зависимостью от величины перегрузки, если отнести его к времени перегрева в условиях теплоизоляции. Полученные соотношения позволяют построить времятоковую характеристику кабельного изделия для всей номенклатуры двухжильных кабелей с поливинилхлоридной изоляцией и оболочкой, которая зависит от материала жилы, размеров кабеля и условий теплообмена с окружающей средой.

Разработана методика выбора аппаратов защиты по условию обеспечения пожарной безопасности кабельных изделий, основанная на полученной зависимости времени нагрева изоляции кабеля от значения протекающего тока и сопоставлении времятоковых характеристик аппаратов защиты и кабельных изделий. В отличие от существующих, она позволяет предотвратить нагрев изоляции кабельных изделий выше предельно допустимых температур за счет своевременного отключения аппарата защиты и, тем самым, обеспечить их пожарную безопасность.

Установлено, что наибольшую пожарную опасность для изоляции кабельных изделий (марок ВВГ2×1,5, ВВГ2×2,5, ВВГ2×4 и ВВГ2×6) представляет сверхток кратностью от 1,6 до 2,6 номинального значения. Указанная кратность сверхтока попадает в область работы тепловых расцепителей, имеющих обратно зависимую от величины тока характеристику отключения, и из-за существующего разброса времятоковых характеристик, допускающих превышение температуры изоляции кабельного изделия выше предельно допустимой, что не соответствует условию безопасной эксплуатации.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Черкасов, В.Н. Пожарная безопасность электроустановок: Учебник / В.Н. Черкасов, Н.П. Костарев. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2002. – 377 с.
2. Борисова, Е.С. Совершенствование методики выбора отключающих защитных аппаратов в электроустановках оперативного постоянного тока электрических станций и подстанций: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / Е.С. Борисова. – М., 2006. – 173 л.
3. Смелков, Г.И. Влияние электрической защиты на пожарную опасность электропроводок. – В кн.: Пожарная профилактика в электроустановках: Сб. науч. тр. – М.: ВНИИПО МВД СССР, 1985, С. 5-12.
4. Маслов, А.В. Разработка методов и способов повышения пожарной безопасности распределительных сетей до 1кВ на промышленных предприятиях: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / А.В. Маслов. – М., 2006. – 128 л.
5. Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.
6. Дворецкий, С.И. Компьютерное моделирование процессов и аппаратов пищевой, био- и химической технологии в среде FlexPDE: Учебное пособие / А.А. Ермаков, О.О. Иванов, Е.И. Акулинин. – Тамбов: Изд-во Тамбовского гос. тех. ун-та, 2006. – 72 с.
7. Аушев, И.Ю. Динамика нагрева многожильного изолированного проводника электрическим током / И.Ю. Аушев, Ю.А. Станкевич, К.Л. Степанов // Вест. Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2012. № 2(16). – С. 87-96.
8. Мисюкевич, Н.С. Методика входного контроля аппаратов защиты / Н.С. Мисюкевич, И.Ю. Аушев // Вестн. Бел. нац. техн. ун-та. – 2010. – № 3. – С. 77-83.
9. Аушев, И.Ю. Выбор аппаратов защиты электропроводок с учетом времятоковых характеристик / И.Ю. Аушев // Энергетика. – 2009. – № 3. – С. 35-41.