

Západočeská univerzita v Plzni

Fakulta elektrotechnická

Katedra technologií a měření

# **DIZERTAČNÍ PRÁCE**

PLZEŇ, 2015

Ing. Martina Polanská

Fakulta elektrotechnická

DIZERTAČNÍ PRÁCE

k získání akademického titulu doktor  
v oboru

Elektrotechnika

**Ing. Martina Polanská**

**Analýza dějů provázejících tepelný  
rozklad kabelové izolace**

*Školitel: doc. Ing. Radek Polanský, Ph.D.*

*Datum státní doktorské zkoušky: 11. 7. 2011*

*Datum odevzdání práce: 16. 9. 2015*

V Plzni, 2015



## **Prohlášení o duševním vlastnictví**

Tímto předkládám k posouzení a obhajobě dizertační práci na téma „Analýza dějů provázejících tepelný rozklad kabelové izolace“ zpracovanou během doktorského studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni pod vedením doc. Ing. Radka Polanského, Ph.D.

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracovala samostatně s použitím literatury a zdrojů uvedených v seznamu na konci této práce.

V Plzni, 16. 9. 2015

.....

Martina Polanská

## Poděkování

Touto cestou bych ráda vyjádřila hluboký vděk těm, kteří se podíleli na vzniku předkládané práce. Děkuji především svému školiteli panu doc. Ing. Radkovi Polanskému, Ph.D. za neocenitelné rady, podněty a podporu při zpracování práce i během celého doktorského studia. Dále pak všem kolegům z Kabelovny KABEX, a.s., kteří také přispěli ke vzniku této práce. Tato dizertační práce vznikla s podporou Evropského fondu pro regionální rozvoj a Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy ČR v rámci projektu Regionální inovační centrum elektrotechniky (RICE), číslo projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0094 a grantu Studentské grantové soutěže ZČU č. SGS-2015-020 „Technologické a materiálové systémy v elektrotechnice”.

## **ANALÝZA DĚJŮ PROVÁZEJÍCÍCH TEPELNÝ ROZKLAD KABELOVÉ IZOLACE**

Předkládaná práce se zabývá sledováním vývoje izolačního odporu kabelů během standardního požárního testu a vyhodnocováním dějů, které se při požáru v izolaci kabelu odehrávají. V úvodních kapitolách se práce zaměřuje na stručný popis způsobů, jakými lze dosáhnout retardace hoření kabelové izolace, zabývá se názvoslovím i skupinou norem týkajících se zkoušení speciálních ohniodolných kabelů. V práci jsou dále diskutována technická omezení nejrozšířenější požární zkoušky používané k testování funkčnosti ohniodolných kabelů za podmínek požáru.

Jádro práce spočívá v navržení technické modifikace stávající měřicí metody spočívající v monitorování aktuálního izolačního stavu kabelové izolace během požárního testu i aktuální teploty uvnitř a vně testovaného kabelu. Vhodnost navržené modifikace je demonstrována sérií zkoušek provedených na dvou nejčastěji používaných typech kabelové konstrukce. Dosažené výsledky potvrzují zcela dostačující citlivost měření izolačního odporu, a tedy vhodnost navržené modifikace pro daný účel. Získané záznamy z měření jsou schopny reflektovat děje, které se odehrávají během tepelného rozkladu jednotlivých částí izolace kabelu. Pracovní hypotézy byly podpořeny provedením termických analýz, jež jsou vhodným nástrojem ke studování mechanismů tepelného rozkladu látek. Bylo zjištěno a potvrzeno, že navržená metoda je vhodná ke sledování a porovnání funkční schopnosti různých konstrukčních uspořádání ohniodolných kabelů při požáru, k analýze mechanismů jejich poruchy či k následné optimalizaci jejich konstrukce.

## **ANALYSIS OF PROCESSES ACCOMPANYING THE THERMAL DECOMPOSITION OF THE CABLE INSULATION**

This doctoral thesis deals with monitoring of insulation resistance of a cable during standard fire test and with evaluation of the processes taking place in the cable insulation during a fire. The introductory parts of this thesis focus on concise description of ways of achieving fire retardancy of the cable insulation, on related nomenclature and on the brief overview of international standards related to testing of low fire hazard cables. Technical limitations of one of the most wide-spread fire test intended for testing of electric cables under fire conditions are further discussed in the thesis.

The core of the dissertation lies in the proposition of new technical modification of the existing standard measuring procedure based on the monitoring of actual insulation state of the cable insulation together with the monitoring of actual temperature of cable core and the cable sheath during a fire test. The suitability of the proposed modification was demonstrated by series of tests of the two most commonly used cable designs. The obtained results confirmed fully sufficient sensitivity of the insulation resistance measurement under fire conditions, therefore applicability of the proposed modification for the given purpose. Obtained records from measurement are able to reflect the processes taking place during the thermal decomposition of particular parts of the cable insulation. The working hypotheses were supported by thermal analyses, which are beneficial tool towards understanding the mechanisms of thermal decomposition of substances. It was proven and confirmed that the suggested modification can assist in the monitoring and comparison of the fire-proof functionalities of different cable designs under fire conditions, in the analysis of their failure mechanisms and in cable design optimisation.

106 pages

41 pictures

4 tables

3 annexes

## **Анализ процессов, сопровождающих термическое разложение изоляции кабеля**

Данная работа исследует развитие сопротивления изоляции кабелей во время стандартных пожарных испытаний и оценку процессов, которые происходят в изоляции кабеля во время горения. В первых главах работы содержится краткое описание способов, которыми можно достичь замедления горения изоляции кабеля, а также терминология, стандарты и нормы, относящиеся к тестированию специальных огнеустойчивых кабелей. В дальнейших главах работы описан теоретический анализ параметров, относящихся к описанию электрических свойств кабелей, а также характеристика процессов, сопровождающих тепловое разложение полимеров, использованных для изоляции кабелей, и кратко описывается теория проводимости ионизированных газов. Далее в работе рассматриваются технические ограничения наиболее распространенного пожарного испытания, использованного для тестирования функциональности огнеустойчивых кабелей в условиях пожара. Суть работы состоит в разработке технической модификации текущего метода измерения, заключающегося в мониторинге актуального изоляционного состояния кабельной изоляции во время пожарного теста, и актуальной температуры внутри и снаружи тестируемого кабеля. Уместность предлагаемой модификации показана в серии испытаний, проведенных на двух наиболее использованных типах кабельной конструкции. Достигнутые результаты подтверждают достаточную точность измерения изоляционного сопротивления, и, следовательно, уместность предложенной модификации. Записи, сделанные в процессе измерений, отражают процессы термического разложения отдельных частей изоляции кабелей. Гипотезы данной работы были обоснованы проведением термических анализов, которые оказались подходящим инструментом для изучения механизмов термического разложения веществ. Было установлено и подтверждено, что предлагаемый метод является подходящим для наблюдения и сравнения функциональности различных конфигураций огнеустойчивых кабелей во время пожара, или последующей оптимизации их конструкций.

106 страниц

41 изображений

4 таблиц

3 вложения

## Obsah

<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>- 10 -</b>
<b>1 ÚVOD</b> .....	<b>- 13 -</b>
<b>2 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY</b> .....	<b>- 16 -</b>
2.1 METODY RETARDACE HOŘENÍ .....	- 17 -
<i>Retardéry hoření na bázi halogenů</i> .....	- 19 -
<i>Retardéry hoření na bázi fosforu</i> .....	- 20 -
<i>Retardéry hoření na bázi silikonu</i> .....	- 20 -
<i>Retardéry hoření na bázi anorganických plniv</i> .....	- 21 -
<i>Retardéry hoření na bázi dusíku</i> .....	- 22 -
<i>Retardéry hoření na bázi nanočástic</i> .....	- 22 -
2.2 NÁZVOSLOVÍ A NORMOVÁ ZÁKLADNA PRO POŽÁRNÍ ZKOUŠKY KABELŮ .....	- 23 -
<i>LFHC kabely typu „R“</i> .....	- 23 -
<i>LFHC kabely typu „V“</i> .....	- 28 -
<i>LFHC kabely s prokázanou funkčností kabelové trasy</i> .....	- 30 -
<i>Třída reakce kabelů na oheň</i> .....	- 33 -
2.3 SHRNUÍ.....	- 35 -
<b>3 CÍLE PRÁCE</b> .....	<b>- 36 -</b>
<b>4 PODSTATA HLAVNÍ MYŠLENKY PRÁCE</b> .....	<b>- 37 -</b>
<b>5 TEORETICKÝ ZÁKLAD MĚŘENÝCH VELIČIN A DĚJŮ PROVÁZEJÍCÍCH TEPELNÝ ROZKLAD</b> .....	<b>- 38 -</b>
5.1 ELEKTRICKÉ PARAMETRY KABELŮ .....	- 38 -
5.2 TEPELNÁ DEKOMPOZICE A HOŘENÍ POLYMERŮ.....	- 43 -
5.3 ELEKTRICKÁ VODIVOST IONIZOVANÝCH PLYNŮ .....	- 47 -
<b>6 POPIS EXPERIMENTU</b> .....	<b>- 49 -</b>
6.1 ZKOUŠENÉ KABELY A JEJICH KONSTRUKCE .....	- 49 -
6.1.1 <i>Kabel se sklosídrovou páskou</i> .....	- 49 -
6.1.2 <i>Kabel izolovaný silikonovým kaučukem</i> .....	- 50 -
6.2 POPIS MĚŘICÍ METODY .....	- 51 -
6.3 POPIS SOUSTAVY KONTINUÁLNĚ ZAZNAMENÁVAJÍCÍ DATA.....	- 53 -
6.4 TERMICKÉ ANALÝZY.....	- 54 -
6.5 MĚŘENÍ ELEKTRICKÉ VODIVOSTI PLAMENE POUŽITÉHO PŘI ZKOUŠCE.....	- 55 -
<b>7 ROZBOR ZÍSKANÝCH VÝSLEDKŮ</b> .....	<b>- 56 -</b>
7.1 CHOVÁNÍ KABELOVÝCH IZOLACÍ V PODMÍNKÁCH POŽÁRU Z HLEDISKA JEJICH STRUKTURY .....	- 56 -

Analýza dějů provázejících tepelný rozklad kabelové izolace

---

7.1.1	<i>Kabel se skloslídovou páskou</i> .....	- 56 -
7.1.2	<i>Kabel izolovaný silikonovým kaučukem</i> .....	- 60 -
7.2	<b>VÝVOJ IZOLAČNÍHO ODPORU KABELOVÉ IZOLACE V PODMÍNKÁCH POŽÁRU</b> .....	- 63 -
7.2.1	<i>Kabel se skloslídovou páskou</i> .....	- 63 -
7.2.2	<i>Modifikace kabelu se skloslídovou páskou</i> .....	- 69 -
7.2.3	<i>Kabel izolovaný silikonovým kaučukem</i> .....	- 71 -
7.2.4	<i>Faktory ovlivňující měření izolačního odporu</i> .....	- 75 -
7.2.5	<i>Vzájemné srovnání obou testovaných konstrukcí kabelů</i> .....	- 76 -
<b>8</b>	<b>SHRNUTÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ A PŘÍNOSY PRÁCE</b> .....	<b>- 79 -</b>
<b>9</b>	<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>- 81 -</b>
	<b>POUŽITÁ LITERATURA</b> .....	<b>- 82 -</b>
	<b>SEZNAM AUTORČINÝCH PUBLIKACÍ</b> .....	<b>- 90 -</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH</b> .....	<b>- 93 -</b>
	PŘÍLOHA A - ZKOUŠKA FUNKČNÍ SCHOPNOSTI KABELOVÝCH SYSTÉMŮ PŘI POŽÁRU.....	- 94 -
	PŘÍLOHA B – PŘÍLOHA Č. 2 VYHLÁŠKY MV Č. 268/2011 SB.....	- 104 -
	PŘÍLOHA C - KLASIFIKACE KABELŮ PODLE JEJICH REAKCE NA OHEŇ.....	- 105 -

## Seznam symbolů a zkratek

### Zkratky a značky:

A <sub>ca</sub>	Eurotřída pro kvalifikaci kabelů podle ČSN EN 50399
ATH	Aluminium tri-hydroxide (hydroxid hlinitý)
a1, a2, a3	Označení kyselosti
B1 <sub>ca</sub> , B2 <sub>ca</sub>	Eurotřídy pro kvalifikaci kabelů podle ČSN EN 50399
C <sub>ca</sub>	Eurotřída pro kvalifikaci kabelů podle ČSN EN 50399
CENELEC	Comité Européen de Normalisation Electrotechnique (Evropský výbor pro normalizaci v elektrotechnice)
ČSN	Česká technická norma
ČR	Česká republika
D <sub>ca</sub>	Eurotřída pro kvalifikaci kabelů podle ČSN EN 50399
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V., příp. Deutsche Industrie-Norm (Německý ústav pro průmyslovou normalizaci, příp. německá průmyslová norma)
DSC	Diferenční skenovací kalorimetrie
DTG	Derivační termogravimetrie
d0, d1, d2	Označení odkapávání hořících částic
E <sub>ca</sub>	Eurotřída pro kvalifikaci kabelů podle ČSN EN 50399
EHS	Evropské hospodářské společenství
EN	Evropská norma
EVA	Kopolymer Etylen vinylacetát
ES	Evropské společenství
E30, E60, E90	Třída funkčnosti kabelové trasy značená podle DIN VDE 4102-12
F <sub>ca</sub>	Eurotřída pro kvalifikaci kabelů podle ČSN EN 50399
FE90, FE180	Značení funkčnosti kabelu v plameni podle VDE 0472 T 814
FR	Fire resistant (ohniodolný)
HDPE	High density polyethylene (vysokohustotní polyetylen)
HM4	Označení bezhalogenové oheňretardující směsi podle DIN VDE 0207-24
HFFR	Halogen-free flame retardant (bezhalogenový, oheňretardující)
IEC	International Electrotechnical Commission (Mezinárodní elektrotechnická komise)
ISO	International Organization for Standardization (Mezinárodní organizace pro normalizaci)
K	typ termočlánku (teplotní rozsah -200 až 1250 °C, složení chromel-alumel)
LDPE	Low density polyethylene (nízkohustotní polyetylen)
LDPE/EVA	Směs nízkohustotního PE a EVA kopolymeru
LFHC	Low fire hazard cables (kabely s nízkým nebezpečím při požáru)
L1, L2, L3	Fázové vodiče
MDH	Magnesium dihydroxide (hydroxid hořečnatý)
MV	Ministerstvo vnitra
N	Nulový vodič
PDMS	Polydimetylsiloxan
PE	Polyetylen
PE	Ochranný vodič
PET	Polyester tape (polyesterová páska), příp. polyetylentereftalát
PLC	Programmable Logic Controller (programovatelný logický automat)
PVC	Polyvinylchlorid



## Analýza dějů provázejících tepelný rozklad kabelové izolace

---

Px-R, PHx-R	Třída funkčnosti kabelové trasy značená podle ZP 27/2008 pro normovou teplotní křivku a pro konstantní teplotu 842 °C
RTG	Rentgenové záření
STN	Slovenská technická norma
s1, s1a, s1b, s2, s3	Označení tvorby kouře
TGA	Termogravimetrická analýza
UV	Ultrafialové záření
VDE	Verband der Elektrotechnik, Elektronik Und Informationstechnik (Asociace pro elektrické, elektronické a informační technologie)
V90, V180	Značení funkčnosti kabelu v plameni podle ČSN IEC 60331
XLPE	Zesítný polyetylen
ZP	Zkušební předpis

### Chemické značky:

Al	hliník
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	oxid hlinitý
Al(OH) <sub>3</sub>	hydroxid hlinitý
Cl	chlor
Cu	měď
HBr	Bromovodík
HCl	Chlorovodík
H <sub>2</sub> O	voda
MgO	oxid hořečnatý
Mg(OH) <sub>2</sub>	hydroxid hořečnatý
N	dusík
P	fosfor
Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	oxid antimonitý
Si	křemík

### Veličiny a jednotky:

$A [cm^2]$	průřez [centimetr čtvereční]
$d, d_1, d_2 [m]$	průměr, průměr pod izolací, průměr nad izolací [metr]
$\vec{E}, E_x [V/m]$	intenzita elektrického pole, vektorová veličina, intenzita elektrického pole v libovolném místě [Volt na metr]
$\vec{F} [N]$	elektrická síla, vektorová veličina [Newton]
$G [S]$	elektrická vodivost [Siemens]
hm%	hmotnostní procenta
$I [A]$	elektrický proud [Ampér]
kg/m	kilogram na metr, jednotka zatížení kabelové trasy
l	litr, jednotka objemu
ln	přirozený logaritmus
mg	miligram, jednotka hmotnosti
min	minuta, jednotka času
MJ	megaJoule, jednotka uvolněného tepla
MJ/kg	megaJoule na kilogram, jednotka spalného tepla
ml/min	mililitr za minutu, jednotka rychlosti průtoku plynu
$n [-]$	četnost měření
pH [-]	vodíkový exponent
s	vteřina, jednotka času

## Analýza dějů provázejících tepelný rozklad kabelové izolace

---

$W, kW$	Watt, kiloWatt, jednotka elektrického a tepelného výkonu
$W/s$	Watt za vteřinu, jednotka rychlosti rozvoje požáru
$q [C]$	elektrický náboj [Coulomb]
$R, R_{iz}, R_{iz, prům.}, R_b$	elektrický odpor, izolační odpor a jeho průměrná hodnota, elektrický
$R_{20} [\Omega, M\Omega]$	odpor závislý na teplotě, elektrický odpor při teplotě 20 °C [Ohm, megaOhm]
$t [cm]$	tloušťka [centimetr]
$T_g, T_f, T_m, T_z [°C]$	teplota skelného přechodu, teplota viskózního toku, teplota tání, teplota tepelné degradace polymeru [stupeň Celsia]
$U [V, kV]$	elektrické napětí [Volt, kiloVolt]
$\alpha_R [°C^{-1}]$	teplotní koeficient elektrického odporu [převrácená hodnota stupně Celsia]
$\gamma$	záření gama
$\gamma [S/m, \mu S/mm]$	konduktivita [Siemens na metr, mikroSiemens na milimetr]
$\varepsilon_B [\%]$	tažnost [procento]
$\varepsilon_r [F/m]$	relativní permitivita [Farad na metr]
$\rho [\Omega \cdot cm]$	rezistivita [Ohm centimetr]
$\sigma_B [MPa]$	mez pevnosti v tahu [megaPascal]
$\Omega/km$	Ohm na kilometr

## 1 Úvod

Pro nezanedbatelnou část naší společnosti je denní užívání elektrické energie prostou nezbytností. S rostoucím zájmem o její využití roste i zodpovědnost za její bezpečný rozvod. Součástí přenosové soustavy jsou kromě nadzemních vedení také kabelové trasy, které tvoří nezbytný spojovací článek při přenosu elektrické energie z míst její výroby do míst spotřeby. Při výrobě kabelů se uplatňuje řada různých materiálů - převážně polymerů, které patří k základním materiálům průmyslové výroby. Mezi hlavní důvody jejich rychlého rozšíření se řadí zejména nízká cena, jednoduchost výroby a široká možnost úpravy jejich vlastností. I dnes jsou vyvíjeny stále nové druhy polymerů, které nacházejí uplatnění v nejrůznějších oborech lidské činnosti. Využití těchto látek je však často limitováno jejich relativně vysokou hořlavostí. Požární analýzy [1] uvádí, že právě kabely jsou velmi často považovány za příčinu vzniku i šíření požáru, přičemž k šíření dochází díky tomu, že kabelové trasy povětšinou vedou celým objektem. Jsou tak často jediným spojovacím prvkem v prostorách jinak požárně oddělených požární stěnou nebo bezpečnostními dveřmi. Konstrukce kabelu i volba vhodných izolačních a plášťových materiálů pak společně určují, jak efektivně bude kabel šíření ohni odolávat.

Zvláštní pozornost je věnována objektům, kde se shromažďuje větší množství lidí, jako jsou například nemocnice, hotely, divadla, obchodní centra, multikina; případně metra nebo parkovací domy, kde jsou kabelové rozvody vedeny ve volném prostoru a kde je zapotřebí v případě hrozícího nebezpečí delšího času k úniku osob do bezpečné vzdálenosti. Ve zmíněných objektech jsou vyžadovány zvýšené požadavky na bezpečnost a tudíž i požární odolnost používaných kabelů. Těmto požadavkům vyhovují pouze kabely určené pro speciální použití, se kterými se můžeme setkat ve všech prostorách s nebezpečím vzniku požáru i jeho šíření po kabelové konstrukci. U kabelů pro speciální použití se klade důraz zejména na zachování jejich funkčnosti při požáru po stanovenou dobu tak, aby bylo možné lidem poskytnout čas potřebný pro únik do bezpečí. Takové kabely se řadí do skupiny tzv. LFHC kabelů (Low Fire Hazard Cables = kabely s nízkým nebezpečím při požáru). Ty se, kromě výše zmíněných objektů, používají v bezpečnostních rozvodech také tam, kde jsou kladeny vysoké nároky na ochranu zařízení, konstrukcí a materiálů (např. výtahové šachty, tunelové stavby či jaderné elektrárny).

V konstrukci LFHC kabelů je možné použít několik typů bariér chránících kabel proti účinkům ohně. Jako základní požární a izolační ochrana jádra umožňující zachování jeho funkčnosti se často používá skloslídová páska. Výrobce [2] uvádí, že se její teplotní odolnost

Analýza dějů provázejících tepelný rozklad kabelové izolace

---

blíží k 1000 °C. Pro výrobu dalších izolačních vrstev kabelu se využívají vytlačované polymerní směsi. Tyto materiály jsou součástí skupiny HFFR (Halogen-Free Flame Retardant = bezhalogenových, oheňretardujících) plastů a většinou obsahují kromě základního polymeru různá aditiva, mezi něž patří např. stabilizátory, změkčovadla, nadouvadla nebo antioxidanty. Právě pro zajištění oheňretardující funkce se následně do polymerní směsi přidává jako aditivum retardér hoření, který dokáže posunout teplotu vzplanutí výsledné izolační vrstvy kabelu až o 300 °C [3] směrem k vyšším teplotám.

Dalším, neméně důležitým požadavkem na používané materiály je co nejmenší tvorba dýmu a toxických zplodin po jejich vzplanutí. Zatímco hustý dým znesnadňuje, či zcela znemožňuje rychlou evakuaci osob, toxické zplodiny jsou příčinou toho, že nepoměrně větší procento lidí zemře při požáru následkem udušení či otravou toxickými zplodinami než následkem uhoření [4]. Z těchto důvodů se dbá na to, aby materiály, z nichž jsou oheň retardující kabely vyrobeny, neobsahovaly halové prvky (fluor, chlor, brom, jód), tj. aby byly tzv. bezhalogenové. Při hoření zmíněných halových prvků se tvoří halogenovodíky, které jsou pro člověka dráždivé a některé mohou být toxické a na ostatní zařízení a konstrukce působí tyto agresivní plyny a páry velmi korozivně.

V návaznosti na evropské a mezinárodní normy požární odolnosti [5] se provádí hned několik zkoušek funkční schopnosti kabelu při požáru společně s testováním dalších důležitých požárních ukazatelů (některé byly zmíněny výše – např. bezhalogenovost), které dokazují bezpečnost použitých materiálů. Jednou z nejčastěji používaných metod pro zjištění funkčnosti kabelu za podmínek požáru je zkouška popsaná v normě ČSN IEC 60331-21 „*Zkoušky elektrických kabelů za podmínek požáru - Celistvost obvodu - Část 21: Postupy a požadavky – Kabely se jmenovitým napětím do 0,6/1,0 kV včetně*“. Tato norma [6] uvádí požadavky na provedení zkoušky, včetně doporučené doby přiložení plamene pro elektrické kabely se jmenovitým napětím do 600/1000 V. Norma dále specifikuje přípravu vzorku, zkušební uspořádání při testu i samotný zkušební postup. Kabely, které mají vydržet i během požáru funkční, musí zajistit po celou dobu trvání zkoušky celistvost elektrického obvodu<sup>1</sup>, přičemž jsou vystaveny přímému působení plamene o teplotě alespoň 750 °C. Doba vystavení plameni se určí podle nejdlejší únikové trasy z hořící budovy do bezpečí. Může být 30, 60, 90 nebo 180 minut. Součástí zkoušky je také předepsaný 15 minutový interval chlazení, po který musí být kabel nadále připojen v obvodu a musí si udržet svoji funkčnost.

---

<sup>1</sup> Kabel má vlastnosti pro zajištění celistvosti obvodu po takovou dobu, kdy během zkoušky [6]:  
- je udržováno napětí, tj. nedojde k přetavení pojistky nebo vypnutí jističe;  
- se nepřeruší vodič, tj. světelný zdroj nezhasne.

Analýza dějů provázejících tepelný rozklad kabelové izolace

---

Zkouška se provádí s použitím přístrojů a zařízení podrobně uvedených v normě ČSN IEC 60331-11 „*Zkoušky elektrických kabelů za podmínek požáru - Celistvost obvodu – Část 11: Zařízení – Samostatné hoření při teplotě plamene alespoň 750 °C*“.

Výše zmíněné testy jsou prakticky prováděny u akreditovaných zkušebních laboratoří a jsou poměrně finančně náročné. Z výsledků těchto zkoušek však vyplyne pouhé stanovisko - kabel vyhověl či nevyhověl podrobenému testu. Výrobce kabelů (zákazník) se nedozví nic o průběhu zkoušky z pohledu chování vnitřní struktury testovaného kabelu za podmínek požáru. Ať už se jedná o kladný či záporný výsledek testu, vyvstává vždy mnoho otázek, např.: Jaký vliv má vysoká teplota plamene na vnitřní strukturu izolace? Do jaké míry se zhoršují izolační vlastnosti kabelu? Jakým způsobem by se dala konstrukce kabelu vylepšit? Jaké je nejslabší místo v konstrukci zkoušeného kabelu? Není kabel z konstrukčního hlediska příliš předimenzován? V současnosti používaná zkušební metoda nedokáže odpovědi na tyto otázky poskytnout. Ovšem je důležité zdůraznit, že to není ani jejím prvotním zájmem.

Z výše uvedených důvodů si tato práce klade za cíl podstatně přispět ke zvýšení vypovídací schopnosti popsaných testů požární odolnosti. V rámci práce byla proto zkušební metoda dle ČSN IEC 60331-21 modifikována za účelem získání více informací o probíhající degradaci kabelu. Připojením měřicí soustavy umožňující kontinuální odečítání izolačního odporu přímo do měřicího obvodu je získán časový záznam vývoje izolačních vlastností kabelu během celého cyklu jeho hoření. V kombinaci se záznamem teploty snímané pomocí termočlánků přiložených k plášti kabelu či vnořených přímo do středu jeho konstrukce a záznamem času, vznikne velmi zajímavá analýza elektroizolačních vlastností kabelu během zkoušky hoření. Na základě získaných výsledků můžeme komplexně popsat tepelný rozklad jednotlivých konstrukčních částí kabelu v závislosti na čase a teplotě přímo za podmínek požáru a detailně tak posoudit jeho konstrukci.

## 2 Současný stav problematiky

K uvedení do problematiky a pochopení všech souvislostí je nasnadě nejprve uvést několik základních definic z oblasti požární ochrany tak, jak je definují normy ČSN ISO 8421-1 „*Požární ochrana – Slovník, Část 1: Obecné termíny a jevy požáru*“ [7] a ČSN 64 0149 „*Stanovení vznětlivosti materiálů*“ [8]:

- **Oheň** je proces hoření charakterizovaný vývinem tepla a doprovázený kouřem nebo plameny nebo obojím.
- **Požár** je hoření šířící se nekontrolovaně v čase a prostoru.
- **Vznětlivost** je schopnost materiálů zapálit se při zahřívání za zvýšených teplot. Vyjadřuje se teplotou vzplanutí a vznícení.
- **Teplota vzplanutí** je nejnižší teplota vzduchu proudícího kolem vzorku, při které dojde působením vnějšího zápalného zdroje k zapálení směsi plyných produktů rozkladu.
- **Teplota vznícení** je nejnižší teplota vzduchu proudícího kolem vzorku, při které dojde k samostatnému zapálení vzorku nebo produktů rozkladu bez přítomnosti vnějšího zápalného zdroje projevujícím se plamenem nebo výbuchem.
- **Teplota samovznícení** je nejnižší teplota, při níž se látka za specifikovaných zkušebních podmínek samovolně vznítí.
- **Bod hoření** je definován jako nejnižší teplota, při které se látka zapálí a dále hoří po stanovenou dobu po přiložení malého plamene k jeho povrchu za normalizovaných zkušebních podmínek.
- **Hoření** je, jak uvádí [9], fyzikálně chemická oxidační reakce, při které hořlavá látka reaguje vysokou rychlostí s oxidačním prostředkem za vzniku tepla a světla. Protože se během ní uvolňuje velké množství tepla, jedná se o reakci exotermickou. Hoření může být dokonalé nebo nedokonalé. O dokonalé spalování se jedná tehdy, nevznikají-li při něm zplodiny schopné dalšího hoření. Vzniká tedy jen oxid uhličitý a vodní páry. Příkladem nedokonalého hoření je pak jakýkoli požár, jedná se o spalování, při kterém vznikají zplodiny schopné dalšího hoření.

Vzniklé teplo z probíhající exotermické reakce se v oblasti hoření nedrží, ale odvádí se do okolí. Podle Volfa [9] může probíhat buď prouděním, sáláním nebo vedením. **Přenos tepla prouděním** probíhá zejména prostřednictvím ohřívání kouře, který může zakládat vlastní ohniska požáru, sám o sobě však vlastní hoření nepodporuje. **Přenos sáláním** je definován vyzařováním tepla z větší části do okolí a z menší části na povrch hořící látky.

## Analýza dějů provázejících tepelný rozklad kabelové izolace

---

Vyzařování tepla do okolí zahřívá okolní konstrukce a materiály, čímž vytváří podmínky pro šíření požáru. Zpětné vyzařování na povrch hořící látky zase nedovolí tomuto povrchu se jakkoli ochladit, zůstává neustále ve vysoké teplotě, čímž se hoření a odpařování hořavin neustále podporuje. Platí tady jednoduchá rovnice: čím větší má látka výhřevnost, tím více tepla se při hoření uvolňuje, tím větší je sálavé teplo i teplo vracející se zpět na povrch látky a hoření je tak intenzivnější. **Přenos tepla vedením** se uskutečňuje zejména pomocí pevných látek, které mají velkou tepelnou vodivost jako např. kovy. Díky této schopnosti však mohou opět přispět k šíření požáru, kdy může rozpálené potrubí zapálit požár na druhé straně stěny.

Mezi často zaměňované pojmy patří degradace a dekompozice plastů. **Tepelná degradace** [10] představuje znehodnocení některých vlastností plastu vlivem zvýšené teploty. Dochází tak k odpařování některých aditiv, jimiž mohou být např. změkčovadla či stabilizátory, v některých případech i retardéry hoření, což má za následek výrazné zhoršení vlastností plastu. **Tepelná dekompozice** (neboli **tepelný rozklad**) je definována jako porušení vazeb v polymeru vlivem zvýšené teploty. Podle toho, v jakém prostředí (oxidační/ inertní aj.) dekompozice probíhá, se pak určují její specifické příklady. Například **pyrolýza** je speciální formou tepelného rozkladu, který probíhá za nepřístupu vzduchu. Materiál je ohříván nad mez své tepelné stability, což vede ke štěpení obsažených organických sloučenin až na stálé nízkomolekulární produkty a tuhý zbytek. Pyrolýzní procesy lze dále podle Horáka [11] rozdělit na tři teplotní intervaly: v intervalu do 200 °C dochází k sušení a tvorbě vodní páry fyzikálními odštěpením vody, jedná se o silně endotermické procesy; v intervalu od 200 do 500 °C probíhá tzv. suchá destilace, při které dochází ke štěpení bočních řetězců vysokomolekulárních látek a jejich přeměna na plynné a kapalné organické produkty a pevný uhlík; během třetího intervalu, mezi 500 až 1200 °C, jsou produkty vzniklé suchou destilací dále štěpeny a transformovány, jedná se o teplotní oblast tvorby plynu, ve které vznikají stabilní plyny (vodík, oxid uhelnatý, oxid uhličitý a metan).

### **2.1 Metody retardace hoření**

Retardéry hoření reprezentují široké spektrum různých chemických přísad, které umožní materiálu zpomalit hoření a tedy posunout jeho teplotní stabilitu do vyšších teplot. Po naplnění plastu retardérem se dosáhne zvětšení tepelné kapacity a snížení objemu hořlaviny.

## Analýza dějů provázejících tepelný rozklad kabelové izolace

Proces hoření se skládá z pěti základních kroků [12], přičemž retardace hoření může být dosažena narušením hořícího procesu v některé z těchto fází:

- ohřev materiálu,
- tepelný rozklad látky,
- vzplanutí,
- samotné hoření nebo spalování,
- propagace ohně neboli jeho šíření,

což může vést k ukončení procesu hoření předtím, než dojde ke vznícení okolních látek.

Obecně lze dosáhnout retardace hoření následujícími fyzikálními a/nebo chemickými mechanismy, které jsou podrobněji rozebrány v [12]–[14]:

1. **ochlazováním** (endotermická reakce rozkladu materiálu pohlcuje teplo vzniklé při hoření, čímž se hořící látka ochlazuje),
2. **vytvořením ochranné vrstvy** (produkty rozkladu setrvávají na povrchu hořící látky a vytváří tak ochrannou uhlíkatou bariéru, která blokuje spalování omezováním přístupu vzduchu; tato vrstva zároveň tepelně izoluje),
3. **ředěním** (retardér uvolňuje při hoření vodu nebo oxid uhličitý, což ředí radikály v plameni tak, že plamen buď zcela uhasí, případně posune hoření do vyšších teplot),
4. **reakcí v plynné fázi** (chemické reakce v plameni mohou být pomocí retardérů přerušeny, dochází tak k blokování mechanismu hoření),
5. **bobtnáním** (retardéry způsobí nabobtnání pod ochrannou vrstvou popela, čímž zajišťují lepší tepelnou izolaci; tyto retardéry se dají aplikovat i jako nátěry).

Obvykle používané retardéry hoření pracují hned s několika těmito mechanismy současně, což efektivně podporuje účel jejich použití. Masařík [3] dělí retardéry hoření do následujících čtyř skupin podle toho, jakým způsobem je lze do základní polymerní směsi zakomponovat:

### **Aditivní retardéry**

Aditivní retardéry hoření jsou látky, které lze do polymeru přidat společně s jinými přísadami za účelem úpravy jeho vlastností. Jedná se o postup technologicky dostupný a propracovaný, který se v podstatě neliší od přidávání jakýchkoli jiných přísad. Volbou úrovně koncentrace je možné ovlivňovat požárně technické charakteristiky plastů žádoucím způsobem. Určitým problémem je zajištění dobré homogenizace aditivních retardérů v polymeru a ovlivnění vlastností výsledného polymeru. Jejich přidání mívá negativní



## Analýza dějů provázejících tepelný rozklad kabelové izolace

---

dopad zejména na mechanické, ale někdy i na elektrické nebo chemické vlastnosti včetně charakteristik stárnutí. Používání aditivních retardérů je typické především pro termoplasty.

### **Reaktivní retardéry**

Retardace pomocí reaktivních retardérů je obvykle velice účinná a má trvalý charakter, je ovšem technologicky náročnější a dražší. Z těchto důvodů není tak rozšířena. Chemické zásahy do řetězce se provádějí zejména u reaktoplastických pryskyřic.

### **Povrchové retardéry**

Retardace pomocí povrchových retardérů je technologicky nejméně náročná a relativně levná. Používají se ve formě nátěrů, nástřiků, nánosů, obalů nebo obkladů. Neovlivňují vlastnosti chráněného plastu, jsou přijatelně dostupné a lze je snadno aplikovat. Problémem je zajištění jejich stálosti v interakci s okolními vlivy počasí a prostředí. Jejich použití je typické zejména pro ochranu vodičů.

### **Intumescentní retardéry**

Intumescentní systémy působí do určité míry jako aditivní a povrchové retardéry současně. Skládají se z více složek a přidávají se do polymeru jako jiné aditivní retardéry. Reakcí složek systému a polymeru při hoření dochází k uhelnatění a současně se z intumescentního systému uvolňují plyny působící jako nadouvadlo. Výsledkem je vytvoření pěnové zuhelnatělé vrstvy na povrchu polymeru, která zabraňuje přístupu kyslíku k povrchu polymeru a převodu tepla ze zóny hoření k polymeru. Tento způsob je používán pro některé termoplasty a je považován za ekologicky šetrnější.

Je zřejmé, že i v tomto rozdělení jednotlivé skupiny retardérů disponují různými kombinacemi fyzikálních a chemických principů retardace. Nejčastěji jsou retardéry tříděny podle jejich chemického složení. Z tohoto hlediska je lze dělit do několika následujících skupin.

### **Retardéry hoření na bázi halogenů**

Představitelé této skupiny retardérů hoření patřili mezi neúčinnější a obecně používané retardéry hoření. Jejich rozšířený popis lze nalézt v materiálech [3], [12], [15]. Brómované nebo chlorované sloučeniny mohou být přidány do polymeru aditivně nebo mohou být některé halogenové struktury zavedeny do polymeru kopolymerizací. Jejich mechanismus retardace tkví v blokaci hoření v plynné fázi pomocí přerušení exotermických procesů. Reakcí HBr nebo HCl s aktivními radikály (princip č. 4 z výše uvedených) dochází

## Analýza dějů provázejících tepelný rozklad kabelové izolace

---

ke zpomalení případně k přerušení reakcí hoření. Vyšší účinnosti retardace se dosáhne modifikací  $\text{Sb}_2\text{O}_3$ , která oddálí proces vzplanutí až o dalších 300 °C. Tato skupina retardérů hoření je však nebezpečná svým dopadem nejen na člověka a životní prostředí, ale i na technologie, které by měla chránit před požárem. Před požárem je sice ochráněná, avšak kvůli velice agresivním parám vznikajícím při hoření, které jsou vysoce korozivní na okolní materiály a konstrukce, použití těchto látek jaksí ztrácí smysl. Nehledě na to, že tyto výpary jsou pro člověka silně toxické a produkty spalování takových látek jsou v životním prostředí velmi stálé a odolné přirozenému rozkladu.

Vzhledem ke zpříšňování zdravotních a ekologických požadavků však konečně dochází k většímu omezení jejich užívání, jak uvádí Kašpar [16] a Šuta [17].

### **Retardéry hoření na bázi fosforu**

Retardéry hoření tvořené sloučeninami fosforu jsou tvořeny širokou škálou různých sloučenin, které jsou šetrné k životnímu prostředí. Mechanismus jejich retardace je popsán např. v [3]. Obecně je využíváno principů retardace č. 2 a 4 z dříve uvedeného seznamu. Tyto retardéry, např. červený fosfor, zachycují během spalování volné radikály, čímž snižují tvorbu hořlavých plynů, a tak potlačují hoření (princip č. 4). Dále na povrchu látky po hoření formují vrstvičku zuhelnatělého zbytku, čímž chrání povrch polymeru před teplem a další reakcí s kyslíkem (princip č. 2) [12]. Červený fosfor je poměrně účinným retardérem, nevyžaduje vysokou koncentraci a jeho vliv na elektrické a mechanické vlastnosti je zanedbatelný. Je netoxický a stabilní při zpracování. Nevýhodou je jeho snadná vznětlivost a výbušnost a tvorba toxického fosfinu ve vlhkém prostředí. Tyto nevýhody lze odstranit smísením fosforu s látkami, které slouží jako jeho nosič při vpravování do polymeru. Výhody takto upraveného fosforu zůstávají zachovány.

### **Retardéry hoření na bázi silikonu**

Přidání i relativně malého množství silikonové směsi do různých polymerů dokáže podstatně zlepšit jejich ohniodolnost. [18] U silikonových retardérů hoření se spojují dva principy retardace: tvoří vrstvu křemičitého popela na povrchu materiálu (princip č. 2) a ředí aktivní radikály v plameni (princip č. 3). Jsou považovány za bezpečné ve vztahu k životnímu prostředí, zejména pak při jejich srovnávání se (zejména dříve) používanými druhy (retardéry na bázi halogenů). Pozitivní je také fakt, že tyto retardéry mají pouze minimální dopad na pokles mechanických vlastností. Další předností je vysoká tepelná odolnost, která umožňuje zpracovávání polymerních směsí i za vyšších teplot. Podrobněji

Analýza dějů provázejících tepelný rozklad kabelové izolace

---

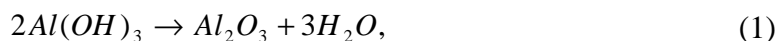
se jednotlivým typům silikonových retardérů hoření věnuje např. Masařík [3]. Novou nadějí jsou pak organicko-anorganické nanokompozitní retardéry hoření na bázi silikonu, které představil Lu a Hamerton [14].

**Retardéry hoření na bázi anorganických plniv**

Tyto retardéry hoření patří v kabelovém průmyslu mezi nejvíce používané. Mechanismus retardace je v tomto případě založen na rozkladu hydroxidů kovů a pokrývá hned tři principy z dříve zmíněných. Během začátku jejich hoření procházejí silně endotermickou reakcí, absorbují teplo ze zóny hoření a ochlazují tak polymerní materiál (princip č. 1), to je provázeno uvolněním značného množství chemicky vázané vody a oxidu uhličitého, čímž snižují tvorbu hořlavých plynů (princip č. 4). Zároveň tvoří na povrchu látky ochrannou vrstvičku oxidu kovu, která chrání a izoluje níže umístěné vrstvy před další tepelnou degradací či dekompozicí (princip č. 2). [19] Tyto retardéry jsou netoxické, efektivně omezují vývin kouře při hoření a jsou relativně levné. Procento jejich objemového plnění je však poměrně vysoké, ve výsledné polymerní směsi se pohybuje mezi 40 až 60 %. Tento fakt je příčinou zhoršení mechanických vlastností použité polymerní směsi.

Nejběžnějšími zástupci jsou hydroxid hlinitý  $Al(OH)_3$  neboli ATH (z angl. Aluminium tri-hydroxide) a hydroxid hořečnatý  $Mg(OH)_2$  neboli MDH (z angl. Magnesium dihydroxide).

**Hydroxid hlinitý** je nejvíce využívaný retardér hoření pro kabelové izolační a pláštěvé materiály, které se zpracovávají při teplotách nižších než 200 °C. Rozkladem hydroxidu hlinitého (rovnice 1) vzniká oxid hlinitý a voda (podle [20] obsahuje ATH téměř 35 % chemicky vázané vody).



Zmíněná reakce nastává u ATH při relativně nízkých teplotách (mezi 200 až 310 °C) [3]. To může být důvodem proč je tento retardér pro některé plasty (např. polypropylen či některé polyamidy) nevyhovující [12] s ohledem na jeho možnou nestabilitu při teplotách jejich zpracování.

Velkou předností hydroxidu hlinitého je jeho hygienická nezávadnost. Produkty jeho rozkladu nejsou korozivní, obvykle mírně snižuje tvorbu kouře při hoření a přijatelný je také po finanční stránce. Jak již bylo řečeno, vzhledem k převážně fyzikálnímu charakteru jeho působení je nutno používat poměrně vysoké koncentrace tohoto retardéru

## Analýza dějů provázejících tepelný rozklad kabelové izolace

---

v polymerech, což výrazně zhoršuje jeho mechanické vlastnosti. Sauerwein [20] uvádí možnosti řešení tohoto problému použitím jemných částic hydroxidu hlinitého společně s úpravou jejich povrchu. Široký sortiment typů hydroxidu hlinitého jej učinil nejrozšířenějším a nejvíce používaným retardérem jak z hlediska objemu spotřeby, tak z hlediska rozmanitosti jeho použití.

**Hydroxid hořečnatý** může být použit v polymerech s vyšší teplotou zpracování, jako je polypropylen nebo některé polyamidy. Rozkladem hydroxidu hořečnatého (rovnice 2) [12] vzniká oxid hořečnatý a voda a tento rozklad začíná při vyšších teplotách (340 – 440 °C) než u předchozího zástupce [3].



Stejně jako hydroxid hlinitý, ani hydroxid hořečnatý a jeho produkty rozkladu nejsou toxické ani korozivní a vykazují menší vývin kouře při hoření.

Masařík [3] dále uvádí, že funkce hydroxidu hořečnatého může být ještě vylepšena v případě jeho přidání do polymerů s bočními reaktivními skupinami, jakými jsou kopolymer etylen-etylakrylát nebo v kabelovém průmyslu často používaný etylen-vinylacetát. Hydroxid hořečnatý pak reaguje s těmito bočními skupinami a tvoří zesíťovanou strukturu polymerních řetězců. Důsledkem takových reakcí je tvorba tepelně stabilní uhlíkaté vrstvy na povrchu polymeru bránící přístupu kyslíku a výměně tepla. Na druhou stranu toto neplatí pro polymery s lineárními řetězci jako je polyetylen. Oxid hořečnatý totiž patří mezi oxidy kovů schopné katalyzovat oxidační reakce uhlíku a uhlíkatých zbytků, což působí proti retardačnímu účinku a může vést k přetrvávajícímu dožehu.

### **Retardéry hoření na bázi dusíku**

Tato skupina retardérů hoření je velice šetrná k životnímu prostředí. Materiály na bázi dusíku s obsahem retardéru hoření mají velmi malý vývin kouře během požáru a jsou vhodné k recyklaci. Nejdůležitější typ organického dusíkatého retardéru hoření je melamin a jeho deriváty. Některé již jsou komerčně dostupné, ale bohužel chybí výsledky výzkumů jejich vhodnosti pro spektrum technických odvětví. Více informací o této skupině podává Lu a Hamerton [14].

### **Retardéry hoření na bázi nanočástic**

Jako retardéry hoření vhodné pro polymerní matrice lze použít i širokou škálu anorganických materiálů ve formě nanočástic, které podrobněji uvádí Jiang [21].

## Analýza dějů provázejících tepelný rozklad kabelové izolace

---

Z představitelů nanočástic se uvádí nejčastěji oxidy kovů (např. křemene, titanu, oxidu hlinitého), karbidy kovů a speciální typy silikonů. Mezi další prostorové formy se řadí jednovrstvá či vícevrstvá uhlíková nanovlákna či nanotrubičky. Nanovrstvy pak reprezentují vrstvené silikáty, vrstvené dvojité hydroxidy, vrstvené titaničitany a další. Mechanismus účinku nanoaditiv na tepelné chování matrice polymerů byl široce zkoumán, ale úplné porozumění tohoto chování není dosud k dispozici. Vliv nanoaditiv na hořlavost polymerů vykazuje značné rozdíly, což je způsobeno charakterem polymeru i druhem použitého nanomateriálu.

### ***2.2 Názvosloví a normová základna pro požární zkoušky kabelů***

Díky retardérům hoření je možno ovlivnit zápalnost a hořlavost plastů používaných pro kabely. Tyto vlastnosti je však nutné na vyrobených kabelech určitým způsobem měřit a vzájemně porovnávat. V této oblasti existuje celá řada zkušebních předpisů, které se pokusí roztřídit následující kapitola.

Kabely LFHC se rozdělují do čtyř základních skupin dle jejich požárních vlastností a tedy i dle technické náročnosti jejich zkoušení. V dalším textu budou specifikovány jednotlivé zkušební metody, které je nutno provést u každého tohoto typu.

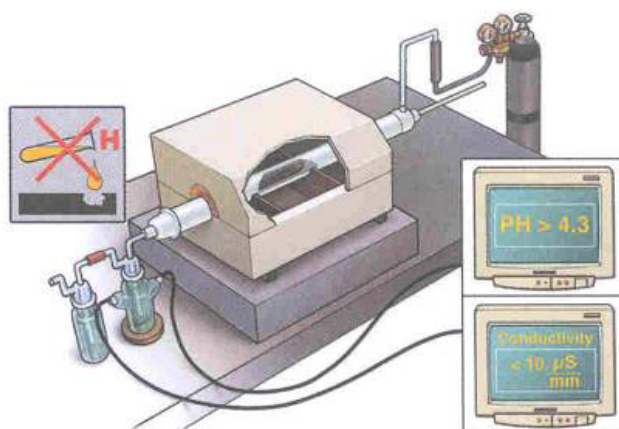
#### **LFHC kabely typu „R“**

Kabely typu R představují první a nejméně chráněnou skupinu kabelů proti požáru. Tyto kabely se nazývají oheňretardující, neboť jejich izolace má za úkol oheň nešířit (retardovat) a v lepším případě jej i potlačovat. Z kabelu se nesmí uvolňovat příliš mnoho dýmu a ten nesmí být toxický. Tyto kabely splňují požadavky provozů, kde se vyžaduje specifická hustota dýmu a korozivita zplodin hoření, odolnost vůči šíření plamene na svazku kabelů a šíření po jednom kabelu neboli samozhášivost.

**Korozivita zplodin** hoření, někdy nazývána také jako bezhalogenovost, se zkouší na zařízení schematicky uvedeném na obr. 1 podle normy ČSN EN 50267 „*Společné metody zkoušek pro kabely v podmínkách požáru - Zkoušky plynů vznikajících při hoření materiálů z kabelů*“ [22]. Zkušební zařízení musí být schopné určit kvantitativní obsah plynů, obzvláště kyselinotvorných a korozivních, uvolněných při hoření nekovových materiálů odebraných z kabelů. Předem určené množství zkoušeného materiálu se spaluje v trubicové peci. Vznikající plyny se zachycují probubláváním v promývacích lahvích, které jsou naplněny destilovanou nebo demineralizovanou vodou. Spalovací proces v peci

Analýza dějů provázejících tepelný rozklad kabelové izolace

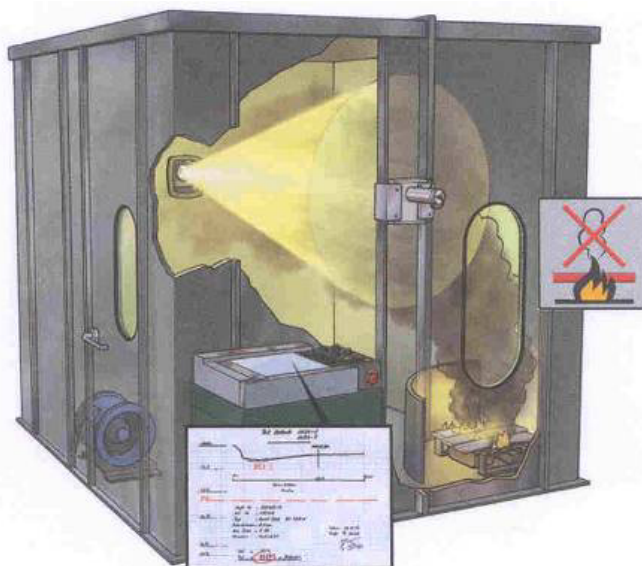
probíhá po dobu 30 minut za dodržení podmínek proudění vzduchu. Po zkoušce se z roztoků v promývacích lahvích stanoví hodnota pH a změří se jejich vodivost.



Obr. 1: Schematické znázornění zkoušky plynů vznikajících při hoření  
(převzato z [23])

Hodnota pH by neměla být menší než 4,3 a hodnota vodivosti nemá překročit 10  $\mu\text{S}/\text{mm}$  (při vztažení obou měření na 1 litr vody/roztoku).

**Měření hustoty dýmu**, emise kouře či dýmivosti při spalování kabelů za definovaných podmínek se provádí podle požadavků normy ČSN EN 61034 „Měření hustoty kouře při hoření kabelů za definovaných podmínek“ a její schematické znázornění ukazuje obr. 2.



Obr. 2: Schematické znázornění komory pro měření dýmivosti kabelů  
(převzato z [23])

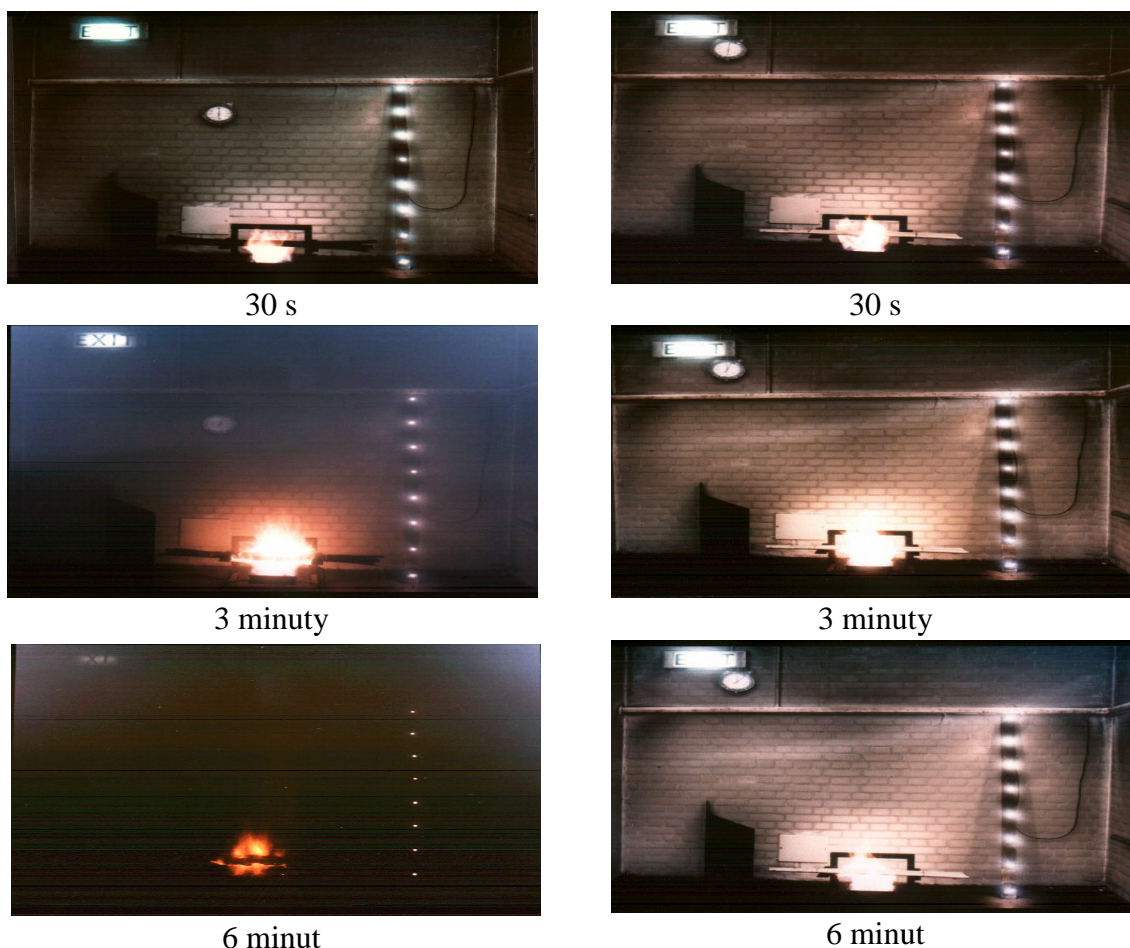
Norma popisuje způsob přípravy a uspořádání kabelů pro zkoušku, metodu hoření kabelů a udává doporučené požadavky pro vyhodnocení výsledků. Zkouška slouží

Analýza dějů provázejících tepelný rozklad kabelové izolace

ke stanovení vlivu hořících kabelů na viditelnost v prostorech se zvýšenou pravděpodobností výskytu osob, výsledek se udává v procentech propustnosti světla.

Zdrojem ohně je hořlavý roztok (90 % etanol, 4 % metanol, 6 % voda), který sám při hoření nevyvíjí žádné zplodiny. Zdrojem světla je 100 W žárovka. Na opačné stěně komory je fotometrický snímač detekující intenzitu dopadajícího světla. Rovnoměrné promíchání kouře se vzduchem zajišťuje cirkulační ventilátor. Průběh změn v intenzitě dopadajícího světla zapisuje záznamové zařízení.

Následující fotografie (obr. 3) ukazují rozdíl v množství produkovaného dýmu a výsledné viditelnosti u klasických PVC kabelů a LFHC kabelů. Fotografie v prvním řádku reprezentují zkušební komoru v čase 30 s po zapálení zkušebních vzorků, fotografie v druhém řádku ukazují stav po 3 minutách a fotografie ve třetím řádku ukazují stav po 6 minutách od zapálení kabelů.



Obr. 3: Porovnání tvorby dýmu u PVC (levý sloupec) a LFHC (pravý sloupec) kabelů v různých časech při měření hustoty dýmu [24]

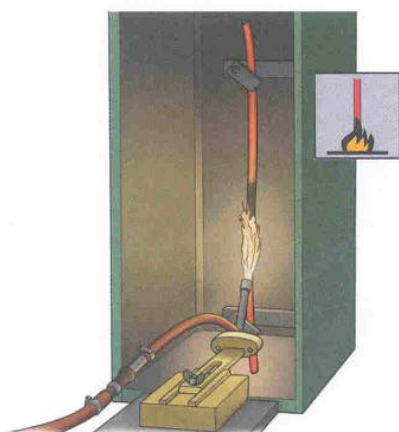
Statistiky uvádějí [25], že při hoření PVC kabelů dochází po pouhých 2 minutách k 60% pohlcení světla, maximum nastává po 5 minutách, přičemž se jedná téměř o 90% pohlcení



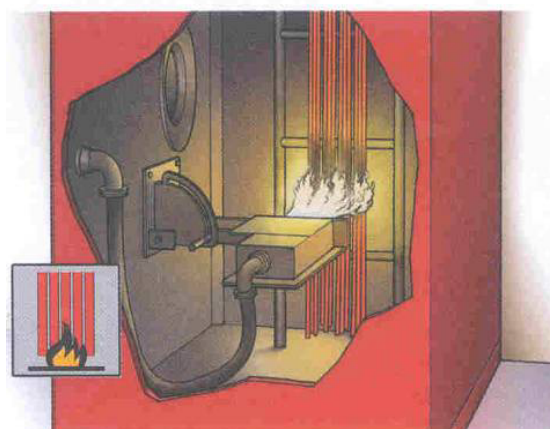
Analýza dějů provázejících tepelný rozklad kabelové izolace

světla. To značí hodnotu, při které je vidět pouze na několik desítek centimetrů. Zde je vidět, jak mnoho LFHC kabely dokážou pomoci zpřehlednit situaci v případě požáru při evakuaci osob a při záchranných pracích hasičů. Podmínky vzniklé při hoření PVC kabelů jsou pro záchranu lidských životů a únik z hořících prostor často naprosto nedostatečné.

**Samozhášivost** se zkouší u samostatně vedeného kabelu (obr. 4) podle ČSN EN 60332-1-1 „Zkoušky elektrických a optických kabelů v podmínkách požáru - Zkouška svislého šíření plamene pro vodiče nebo kabely s jednou izolací - Zkušební zařízení“. Zkouška s podobným uspořádáním zkušebního zařízení měřená pro kabelové svazky (obr. 5) se nazývá zkouška **šíření plamene** a probíhá podle ČSN EN 60332-3-22 „Zkoušky elektrických a optických kabelů v podmínkách požáru - Zkouška vertikálního šíření plamene na vertikálně namontovaných svazcích vodičů nebo kabelů“).



Obr. 4: Schematické znázornění měření samozhášivosti (převzato z [23])



Obr. 5: Schematické znázornění měření vertikálního šíření plamene ve svazku (převzato z [23])

Nelze však předpokládat, že pokud kabel nebo vodič vyhoví požadavkům na samozhášivost, bude se následně podobným způsobem chovat i svazek stejných vodičů během zkoušky na šíření ohně, což popisuje [26]. Je to dáno tím, že šíření plamene podél svislého svazku kabelů závisí na mnoha činitelích, mezi které patří:

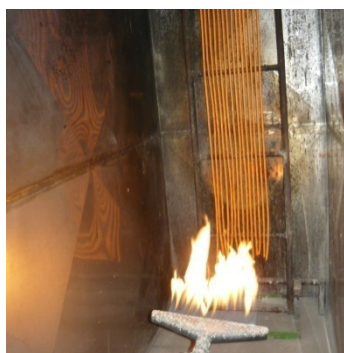
- objem hořlavého materiálu vystavený požáru a jakémukoliv plameni,
- geometrické uspořádání kabelů,
- teplota, při které je možno zapálit plyny uvolňované z kabelů,
- množství hořlavého plynu uvolněného z kabelu při daném oteplení,
- objem vzduchu procházející instalací kabelů a
- konstrukce kabelu.



Analýza dějů provázejících tepelný rozklad kabelové izolace

Při zkouškách dle této normy (ČSN EN 60332-3-22) záleží na množství nekovových materiálů na metr zkoušeného vzorku. Tato norma uvádí čtyři rozdílné kategorie zkoušek, které se liší dobou trvání zkoušky, způsobem montáže vzorku a objemem nekovového materiálu zkoušeného vzorku, přičemž se nebere v úvahu jejich použití např. pro silové kabely, kabely na přenos dat, kabely s optickými vlákny, telekomunikační rozvody atd.

Zkušební plamen se přikládá na dobu 40 minut (v některých případech na 20 minut). Následně je plynový hořák vypnut, hořící vzorek uhašen a očištěn od sazí. Pokud je původní povrch vzorku nepoškozen, všechny saze a jakékoli deformace nekovového materiálu se zanedbají. Rozšíření plamene se měří jako poškození, jehož rozsah je dán od spodní hrany hořáku po začátek zuhelnatění. Začátek zuhelnatění se určuje přitlačením ostrého předmětu proti povrchu kabelu. V místě, kde se povrch kabelu mění z pružného na křehký (drolící se), se zaznamená počátek zuhelnatění. Pokud je začátek zuhelnatění zaznamenán ve výšce nad 2,5 m od spodní hrany hořáku, zkouška je nevyhovující. V případě rozporu se provedou další dvě zkoušky. Jestliže obě vyhoví (výška poškození nepřekročí 2,5 m od spodní hrany hořáku), zkouška se považuje za vyhovující a kabel je klasifikován jako „**oheň nešířící**“ či „**oheň retardující**“. Velice často bývá tento či jiné výrazy z oblasti požárně bezpečných kabelů zaměňován s výrazem „nehořlavý kabel“. Toto označení je však zcela špatné a nelze použít, neboť o nehořlavý kabel se nejedná ani v jednom případě. U použitých polymerů se sice přidáním retardérů hoření stupeň hořlavosti snižuje, ovšem dokonalé odstranění hořlavosti polymerů je dosud nereálné [27]. Oheň retardující kabely mají většinou oranžovou barvu pláště a za jejich písemné označení na plášti se připojí písmeno „-R“. Tyto kabely se používají právě v místech se zvýšenou koncentrací osob, finančně náročných technologií či v místech se zvýšeným rizikem vypuknutí požáru. V reálném měřítku pak fotodokumentace ze zkoušek vertikálního šíření plamene vypadá tak, jak ukazuje obr. 6, 7 a 8.



Obr. 6: Měřený svazek kabelů před zkouškou



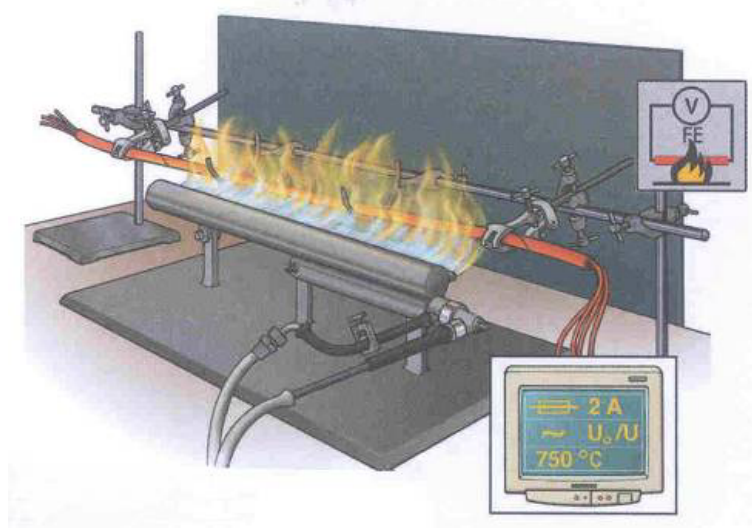
Obr. 7: Měřený svazek kabelů během zkoušky



Obr. 8: Měřený svazek kabelů po zkoušce

**LFHC kabely typu „V“**

Pro kabely typu V platí stejné podmínky a normy jako pro skupinu kabelů typu „R“ a dále musí splňovat požadavky normy ČSN IEC 60331-11 „Zkoušky elektrických kabelů za podmínek požáru – Celistvost obvodu – Zařízení – Samostatné hoření při teplotě plamene alespoň 750 °C“. Tato norma [6] specifikuje zkoušení kabelů, u kterých se vyžaduje zachování celistvosti obvodu při vystavení účinkům samostatného plamene o teplotě nejméně 750 °C. Vzorek kabelu musí být držen horizontálně pomocí podpěr. Na jedné straně musí být bezpečně sevřen a na straně druhé musí být upevněn tak, aby se umožnilo prodloužení v podélném směru způsobené teplem. Střední část kabelu musí být podepřena dvěma kovovými kroužky, které musí být uzemněné. Uspořádání nosného systému je schematicky znázorněno na obr. 9. Zdroj tepla je tvořen pásovým propanbutanovým hořákem s Venturiho směšovačem. Hořák musí být umístěn souběžně se vzorkem.



Obr. 9: Schematické znázornění měření celistvosti obvodu (převzato z [23])

Zkoušeným vzorkem je kabel o délce alespoň 1,2 m, ze kterého je odstraněno na každém konci přibližně 10 cm pláště nebo vnějších obalů. Na obou koncích kabelu se každý vodič upraví vhodným způsobem pro elektrické připojení a obnažené vodiče se rozloží tak, že je vyloučen jejich vzájemný dotyk. Po celou dobu zkoušky prochází všemi vodiči kabelu proud dodávaný trojfázovým transformátorem zapojeným do hvězdy s dostatečným výkonem pro udržení zkušebního napětí až do maximálního přípustného protékajícího proudu. Tohoto proudu se dosáhne připojením vhodné zátěže na opačném konci vzorku a připojením indikačního zařízení. Často se do obvodu zapojují žárovky, které jednoduše světelně indikují nepřerušeni či přerušeni dané žíly, takový příklad znázorňuje obr. 10.



Obr. 10: Měřicí soustava v laboratoři Kabelovny KABEX, a.s.

Doba přiložení plamene odpovídá době stanovené příslušnou normou pro kabel. V případě, že taková norma neexistuje, doporučuje se doba 90 minut. Zkouška probíhá po celou dobu přiložení plamene, pak se plamen uhasí, ale vzorek kabelu zůstává pod napětím po dobu dalších 15 min. Celková doba trvání zkoušky je tedy tvořena dobou přiložení plamene a 15 minutami chladnutí. LFHC kabely typu „V“ mají obvykle hnědou barvu pláště a za jejich písemné označení je připojeno -V90 nebo -V180 podle doby, po kterou si udržely v plameni svoji funkčnost (v případě kvalifikace těchto kabelů podle německé normy VDE 0472 T 814 se připojuje označení -FE90 nebo -FE180).

Kabely typu „V“ se používají zejména pro požární signalizaci, hasicí zařízení, zařízení pro odvod tepla a kouře, čerpadla požární vody, otevírání a zavírání dveří, pro rozhlas, nouzové osvětlení únikové cesty a evakuační výtahy. Zkouška je považována za vyhovující, pokud je udržováno napětí (tj. nedojde k přetavení pojistky nebo vypnutí jističe) nebo dokud se nepřeruší vodič (tj. světelný zdroj nezhasne). V případě rozporu se zkouší další dva vzorky, a pokud oba vyhoví, kabel je klasifikován jako „**ohniodolný**“.

Funkční schopnost kabelů s mechanickým rázem (pro bezpečnostní obvody) se zkouší podle normy ČSN EN 50200 „Zkušební metoda odolnosti při požáru pro nechráněné kabely malých průměrů určených pro použití v nouzových obvodech“ nebo podle ČSN EN 50362 „Zkušební metoda odolnosti při požáru pro nechráněné silové a ovládací kabely velkých průměrů pro použití v nouzových obvodech“ a probíhá podle upraveného uspořádání předchozí metody. Tyto normy [28], [29] stanovují zkušební metody a postupy pro kabely s konstrukcí pro vlastní odolnost při požáru, které jsou určeny pro použití v nouzových poplašných, osvětlovacích a komunikačních obvodech. Pro každý zkoušený kabel se zaznamená doba odolnosti při požáru až do okamžiku poruchy nebo až do maximální doby odolnosti při požáru 90 min (pro silové kabely 120 min). Napětíová

Analýza dějů provázejících tepelný rozklad kabelové izolace

hladina při zkoušce je obdobná jako u normy ČSN IEC 60331, pro silové kabely jmenovité napětí a pro sdělovací kabely napětí 110 V. Při zkoušení optických kabelů se sleduje jejich útlum. Kabel je instalován na zkušební stěnu s minimálním poloměrem ohybu a je testován při minimální zkušební teplotě 842 °C a nárazem tyče na kabelovou podpěru během každých 5 min.

**LFHC kabely s prokázanou funkčností kabelové trasy**

Pro tyto kabely platí všechny normy uvedené pro LFHC kabely typu „V“ a dále Zkušební předpis ZP 27/2008 „Pro stanovení třídy funkčnosti kabelů a kabelových nosných konstrukcí – kabelových tras v případě požáru“. Tento předpis [30] platí pro stanovení a ověření opatření k docílení funkčnosti kabelových tras v případě požáru. Kabelovou trasou se rozumí systém kabelu a jeho podpěrné konstrukce včetně držáků a příchytok (obr. 11), jednotlivé typy instalace, které se zkouší, jsou následující:

- instalace kabelů na kabelových žebřících;
- instalace kabelů na kabelových žlabech (plechových nebo drátěných);
- jednotlivá instalace kabelů pod stropem;
- instalace kabelů na výložnicích, háčích, konzolách, v trubkách nebo při jakémkoliv jiném, zadavatelem zkoušky individuálně definovaném, typu instalace.



jednotlivé příchytky

příchytky s opěrkou

kabelový žebřík

kabelový žlab

Obr 11.: Ukázky kabelových tras (převzato z [31])

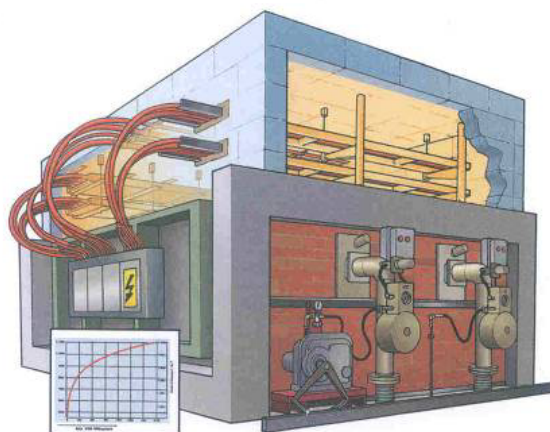
Instalační kabelové podpěrné systémy se musí při zkoušce opatřit odpovídajícím rovnoměrným náhradním zatížením, které garantuje výrobce těchto podpěr. Realizuje se pomocí zavěšení přímkových ocelových závaží nebo ocelových řetězů o definované hmotnosti.

Oblast použití této zkoušky je omezena na silnoproudé, sdělovací a zabezpečovací elektrické kabely se jmenovitým napětím do 1 kV a na optické kabely. Funkčnost kabelových tras je splněna, pokud při zkoušce nedojde ke zkratu nebo k přerušení vodiče.



Analýza dějů provázejících tepelný rozklad kabelové izolace

Třída funkčnosti kabelové trasy je doba v minutách, po kterou si kabelová trasa zachová svoji funkčnost. Dle tohoto zkušební předpisu je možné kabely označit jako P15-R až P120-R, přičemž tato klasifikace odpovídá podmínkám stanoveným vyhláškou č. 23/2008 Sb., o technických podmínkách požární ochrany staveb (někdy se můžeme setkat i s označením E30 až E90, jedná se o značení podle německé normy DIN VDE 4102-12). Zde uvedené písmeno „R“ značí klasifikaci kabelu spojenou s použitou podpěrnou konstrukcí. Pro provedení této zkoušky jsou kabely instalovány do normované zkušební komory (obr. 12) na kabelové podpěrné lávky.



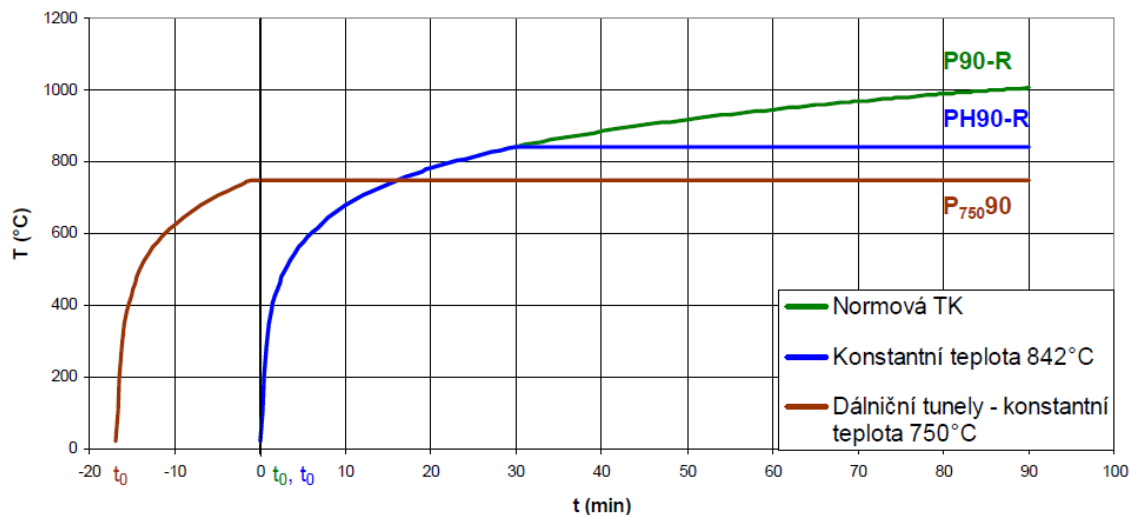
Obr. 12: Schematické znázornění zkoušky funkčnosti kabelových tras  
(převzato z [23])

Uspořádání a zavěšení zkušebních vzorků musí odpovídat provedení v praxi. Vzorky se zavěsí odpovídajícími prostředky na předpokládané nosné konstrukce nebo se upevní přímo na strop či stěnu. Opatření pro zabezpečení funkčnosti se zkouší při vodorovné instalaci. Zkušební sestava pro silnoproudé kabely se skládá vždy nejméně ze dvou vzorků jednoho čtyř-žilového kabelu s nejmenším přípustným jmenovitým průřezem kabelu a nejméně dvou vzorků čtyř-žilového kabelu se jmenovitým průřezem kabelu 50 mm<sup>2</sup> nebo větším. Zkušební výsledky jsou platné pro všechny průřezy příslušného konstrukčního typu kabelu a pro příslušné způsoby instalace. Při zkoušce ovládacích kabelů a vedení pro sdělovací zařízení je nutno pro zkoušku použít vždy minimálně dva vzorky kabelu s nejmenším přípustným počtem žil, případně párů pro každý typ a způsob uložení (nebo dva vzorky optických kabelů).

Instalované vzorky kabelů jsou připojeny do elektrického obvodu podle vzoru, uvedeném v normě ČSN IEC 60331. V průběhu požární zkoušky se zajistí zkušební napětí pro silnoproudé kabely 400/230 V při frekvenci 50 Hz sdruženého napětí nebo

### Analýza dějů provázejících tepelný rozklad kabelové izolace

230 V při frekvenci 50 Hz fázového napětí a pro sdělovací kabely 110 V při frekvenci 50 Hz fázového napětí. Hodnoty elektrického proudu a napětí se průběžně měří a zaznamenávají. Kabelové trasy jsou poté zatíženy podle normové teplotní křivky (obr. 13), jejíž maximum je 1000 °C (funkčnost kabelové trasy je pak klasifikována třídou funkčnosti P).



Obr. 13: Znáznornění normové teplotní křivky a dalších dvou různých požárních scénářů (převzato z [31])

Teplotní zatížení komory může probíhat podle několika různých požárních scénářů, nejčastější alternativou k normové křivce je působení konstantní teploty 842 °C (funkčnost kabelové trasy je při tomto scénáři klasifikována třídou funkčnosti PH). Působení teploty podle jiného požárního scénáře je pak klasifikována popisem daného požárního scénáře a dobou funkčnosti. U instalovaných vzorků se hodnotí, zda nedošlo během zkoušky ke zkratu nebo k přerušení vodiče. Směrodatný, pro zařazení elektrických kabelových tras do třídy funkčnosti, je nejhorší výsledek nejméně dvou stejných vzorků kabelu uložených na daném typu nosné konstrukce. Možné varianty klasifikací jsou uvedeny v tabulce 1.

Tab. 1: Možné varianty klasifikací v závislosti na požárním scénáři [30]

Normová teplotní křivka	Konstantní teplota 842 °C
P 15-R	PH 15-R
P 30-R	PH 30-R
P 60-R	PH 60-R
P 90-R	PH 90-R
P 120-R	PH 120-R

## Analýza dějů provázejících tepelný rozklad kabelové izolace

---

Podrobnější informace o podmínkách provádění zkoušky funkčnosti kabelových tras jsou včetně fotodokumentace uvedeny v Příloze A této práce.

### **Třída reakce kabelů na oheň**

Poslední skupinu tvoří kabely, u nichž je třeba dokládat jejich reakci na oheň. Od roku 2014 je povinnost tuto vlastnost uvádět u všech kabelů, které se považují za součást stavby. Podívejme se ale stručně na historický vývoj skutečností a důvodů, které vedly k začlenění kabelů mezi stavební výrobky.

První rozhodnutí Evropské komise o klasifikaci stavebních výrobků podle jejich reakce na oheň bylo vydáno v roce 2000 pod označením 2000/147/EC. Brzy však vyvstala potřeba do stavebních výrobků zahrnout i kabely, které nejsou umístěné pod omítkou, ale jsou volně vedené stavbou na kabelových roštech či lávkách. Kabely, které jsou vnímány jako součást stavby, jsou tedy výrobky stavebními, ale současně i výrobky elektrotechnickými a jejich standardizace je tedy v rukou mezinárodních organizací IEC a CENELEC. Tyto organizace pochopitelně vyvíjejí snahu, aby zkoušení kabelů včetně reakce na oheň probíhalo podle elektrotechnických norem. Po táhlých jednáních a domluvách vydala nakonec Komise v roce 2006 nové rozhodnutí č. 2006/751/ES a upravila klasifikační třídy přímo pro kabely. Vznikla nová norma EN 50399 „*Reaction to fire test, Common test method for cables under fire conditions – Heat release and smoke production measurement on cables during flame spread test*“, v níž jsou uvedeny zkušební metody pro klasifikaci kabelů do jednotlivých tříd.

V ČR byly požadavky na kabely a jejich použití dle třídy reakce na oheň zavedeny vyhláškou MV č. 23/2008 Sb. o technických podmínkách požární ochrany staveb. Tato vyhláška byla změněna v září 2011 vydáním Vyhlášky MV č. 268/2011 Sb., jejíž příloha č. 2 uvádí, v jakých místech se mají použít kabely různých tříd (podrobněji viz tabulka B-1 v Příloze B této práce).

Samotná klasifikace kabelů podle jejich reakce na oheň je uvedena v Rozhodnutí Komise 2000/147/ES, „*kterým se provádí směrnice Rady 89/106/EHS, pokud jde o klasifikaci reakce stavebních výrobků na oheň*“ ve znění Rozhodnutí Komise 2003/632/ES a 2006/751/ES a v normě ČSN EN 13501-6 „*Požární klasifikace stavebních výrobků a konstrukcí staveb – Část 6: Klasifikace podle výsledků zkoušek reakce na oheň elektrických kabelů*“ (podrobněji viz tabulka C-1 a C-2 v Příloze C této práce). Tato norma byla převzata originálem, proto je v ČSN pouze její anglické znění.

Analýza dějů provázejících tepelný rozklad kabelové izolace

---

Nově vzniklá ČSN EN 50399 „Zkušební metody kabelů v podmínkách požáru – Měření uvolněného tepla a kouře na kabelech v průběhu zkoušky šíření plamene – Zkušební zařízení, postupy a výsledky“ specifikuje zkušební zařízení a postup zkoušky pro stanovení reakce kabelů na oheň. Zkušební metoda [32] popisuje středně náročnou požární zkoušku kabelů nainstalovaných na svislém kabelovém žebříku, která se provádí s definovaným zdrojem zapálení, aby bylo možno vyhodnotit následující parametry:

- šíření plamene,
- rychlost uvolňování tepla,
- celkově uvolněné teplo,
- rychlost vývinu kouře,
- celkově vytvořený kouř,
- index rychlosti rozvoje požáru,
- výskyt hořících kapek/částic.

Základní zkušební zařízení je stejné jako pro měření šíření plamene v ČSN EN 60332-3-10. V tomto případě ovšem musí být doplněno přístroji pro měření uvolněného tepla a tvorby kouře v průběhu zkoušky. Bylo dokázáno [33], že použití těchto přídavných měřících technik, které byly prověřeny v dalších standardních testech pro stavební výrobky, je vhodné také pro stanovení reakce elektrických kabelů na oheň. Tyto techniky vytvářejí v porovnání s metodou popsanou v ČSN EN 60332-3-10 komplexnější vyhodnocovací systém, který je přesnější a citlivější a poskytuje větší množství rozlišitelných úrovní chování při požáru.

Uspořádání kabelové instalace může mít při skutečném požáru rozhodující vliv na šíření plamene, uvolňování tepla i tvorbu kouře. Pokud se tedy porovnávají naměřené parametry a dávají se do souvislosti s úrovní bezpečnosti skutečných kabelových instalací, je třeba mít toto na paměti. Jak uvádí norma [32], tyto parametry závisejí zejména na následujících vlivech:

- na množství hořlavého materiálu vystaveného požáru, s čímž souvisí vznik plamene anebo většího množství tepla;
- na geometrickém uspořádání kabelů a jejich spojitosti s okolím;
- na teplotě, při které je možné zapálit plyny, které se uvolňují z kabelů vlivem zvýšené teploty;
- na množství vzduchu, který prochází kabelovou instalací;
- na konstrukci kabelu.



Plyny vznikající při hoření jsou jímány do digestoře nad zkušební komorou a vedeny potrubím, které umožňuje měření rychlosti uvolňovaného tepla a tvorby kouře. Norma uvádí postupy typových schvalovacích zkoušek pro klasifikaci kabelů do eurotříd B1<sub>ca</sub>, B2<sub>ca</sub>, C<sub>ca</sub> a D<sub>ca</sub> (viz ČSN EN 50399).

### **2.3 Shrnutí**

Z výše uvedeného přehledu je zřejmé, že orientace v normách určených pro protipožární kabely je značně složitá. Do hlavních odvětví zájmu o tuto tematiku spadá jak požární bezpečnost a elektrotechnika, tak i mnohé další obory, např. ochrana životního prostředí, která bez přihlídnutí k jiným oblastem udává mnoho požadavků na používané výrobky a materiály, jejich výrobu i likvidaci. Požární ochrana si klade za úkol ochranu zdraví lidí a zvířat, potažmo zařízení a budov před vznikem požáru. V případě jeho vzniku dbá na co nejrychlejší zásah a snaží se takovým situacím předcházet formováním nejrůznějších pravidel, předpisů a norem. Neméně důležitá je i oblast elektrotechnická, která se stará o bezpečnost lidí a zvířat před úrazem elektrickým proudem a klade si za cíl (ve smyslu této dizertační práce) zajistit funkčnost přístrojů a zařízení i v případě požáru. Nutnost vyjít vstříc v požadovaných zkouškách a kontrolovaných parametrech oběma stranám je více než zřejmé, ovšem také často velmi těžko proveditelná. Normy vznikající pro kabely a vodiče, které jsou součástí budov, musejí projít schvalovacím řízením jak osob zabývajících se požární ochranou, tak osob působících v kabelovém odvětví. V zájmu obou těchto skupin je samozřejmě co nejefektivnější domluva ve smyslu tvorby přehledného normového aparátu pro snadnou orientaci jeho uživatelů.

### 3 Cíle práce

Potřebu předcházet požárním katastrofám samozřejmě pociťuje nejen oblast požární ochrany, ale i kabelový průmysl, a proto se obě tyto strany na tvorbě norem aktivně podílí. Jejich společnou snahou je schvalovat testy a zkoušky, u kterých je dobrá zkušenost s opakovatelností jejich výsledků, jsou relativně snadno proveditelné a nejsou příliš finančně nákladné.

Zdárným příkladem je zkouška šíření plamene po kabelovém svazku (dle ČSN IEC 60332), která byla modifikována v posledních letech. Díky dodatečnému připojení měrné jednotky pro analýzu plynů a systémů měřících množství uvolněného tepla a kouře je nyní možné vyhodnotit z průběhu tohoto testu mnohem více dat (viz str. 31 a kapitola Třída reakce na oheň). Ta nám umožňují získat další důležité poznatky o testovaném kabelu i použitých materiálech a ne pouze informaci o šíření ohně tak, jako tomu bylo před novelizací zmíněné normy.

Cílem této dizertační práce je přispět k řešení problematice podobným způsobem. Z tohoto důvodu se zabývá úpravou zkoušky funkční schopnosti kabelu při požáru (prováděné standardně podle normy ČSN IEC 60331), která je mezi výrobci kabelů často používaná a mají s ní již mnohaleté zkušenosti.

Hlavní cíle předložené práce jsou následující:

1. modifikovat zkoušku funkční schopnosti kabelu při požáru (ČSN IEC 60331-21) s cílem zvýšit její vypovídací schopnost o konstrukci kabelu a schopnosti jednotlivých izolačních vrstev odolávat přímému působení plamene,
2. vytvořit, popsat a ověřit zcela nové měřicí postupy,
3. vybrat nejčastěji používané konstrukce ohniodolných kabelů a podrobit je nově navržené zkoušce,
4. detailně interpretovat dosažené výsledky i děje doprovázející tepelný rozklad jednotlivých částí kabelů a vytvořit tak znalostní databázi důležitou pro případné budoucí nasazení metody do praxe.

## 4 Podstata hlavní myšlenky práce

Navržená modifikace zkoušky podle normy ČSN IEC 60331-21 „*Zkoušky elektrických kabelů za podmínek požáru - Celistvost obvodu*“ spočívá v upravení elektrického obvodu, do kterého je zkoušený kabel, zatížený nejen napětím, ale i plamenem, připojen. Hlavní myšlenka vznikla v roce 2012 v Kabelovně KABEX, a. s., kde pracuji v laboratoři termických analýz a podílím se na řadě dalších zkušebních měření.

Modifikovaná metoda si klade za cíl sledovat a zaznamenávat vývoj izolačního odporu mezi žilami kabelu kontinuálně během celé zkoušky – jak během zatížení plamenem, tak po vypnutí hořáku a tedy v průběhu chladnutí kabelu. Pro ucelenější představu o působení teploty plamene na jednotlivé části kabelu by měly být během zkoušky použity také dva termočlánky. První z nich, umístěný na povrchu kabelu (tedy v přímém kontaktu s plamenem) umožňuje kontrolovat teplotu plamene, která je ovlivňována exotermickými, i endotermickými ději doprovázejícími spalováním jednotlivých částí kabelu. Druhý termočlánek by měl být umístěn do středu kabelu mezi žíly. To umožňuje sledovat postupný nárůst teploty uvnitř kabelu a následně poskytnout představu o podmínkách, které působí na jeho vnitřní části. Z mnoha důvodů je výhodné zaznamenávat údaje z obou termočlánků během celé zkoušky. Výsledkem je analýza poskytující detailní představu o působení plamene jak na kabel a všechny jeho konstrukční části, tak na vývoj izolačního odporu během celé zkoušky. Poměrně jednoduchou úpravou měřicího obvodu tedy získáme ucelený náhled na funkčnost daného typu kabelu v podmínkách požáru.

V obecném slova smyslu můžeme mluvit o určité formě „průmyslové“ termické analýzy, při které je kabel vystaven zadanému teplotnímu programu a díky zaznamenané křivce izolačního odporu i teplotním křivkám z obou termočlánků umožňuje diagnostikovat mnoho fyzikálních dějů i chemických reakcí doprovázejících hoření kabelu.

Po získání nezbytné praxe s touto metodou, je možno na základě získaných výsledků ihned zhodnotit, v jakých konstrukčních částech je kabel poddimenzován či předdimenzován, zda vyhovuje požadovaným technickým parametrům či ekonomickým požadavkům kladeným na výrobu.

Pro pochopení jednotlivých souvislostí vyplývajících z podstaty této práce bude v následujících kapitolách uvedeno stručné shrnutí poznatků a pojmů souvisejících s elektrickými parametry, které jsou standardně měřeny na kabelech, se základy tepelné degradace polymerů a podstatou vodivosti ionizovaných plynů.

## 5 Teoretický základ měření veličin a dějů provázejících tepelný rozklad

### 5.1 Elektrické parametry kabelů

Kabely a vodiče patří do kategorie výrobků, u kterých je důležitá jejich podélná rovnoměrnost (homogenita) elektrických, mechanických, tepelných a jiných užitných vlastností. Z toho vyplývá, že kvalita kabelů nebo vodičů je v celé jejich délce taková, jaká je v jejich nejhorším místě. Proto je nezbytně nutné provádět kontrolu a měření jejich vlastností v průběhu celého výrobního procesu.

Obecně vzato je izolační systém každého kabelu složen z izolace a pláště. Izolace je chápána jako dielektrikum, které odděluje vodivé jádro jak fyzicky, tak elektricky. Její primární funkcí je chránit vodivé jádro a zajišťovat tak přenos elektrické energie. Plášť kabelu pak představuje vnější obal celého kabelu, který ho chrání před vnějšími vlivy. V dalším textu této kapitoly bude uveden stručný popis základních elektrických parametrů, které se na kabelech měří v rámci kontroly sériové výroby nebo které je třeba připomenout pro pochopení některých souvislostí.

Ideální izolační materiál by neměl obsahovat žádné volné nosiče náboje. U těch reálných to však zcela neplatí. Vlivem vnějšího elektrického pole se na povrchu i uvnitř dielektrika objevuje, ve větší či menší míře, vázaný elektrický náboj. Tento jev je nazýván polarizací, což znamená, že dielektrika získávají (ať již v interakci s elektrickým polem či ne) určitý dipólový moment. Polarizace se navenek projevují měřitelnou elektrickou vodivostí izolačního materiálu. Z hlediska kabelových izolací je důležité používat převážně nepolární látky, které ve své struktuře neobsahují téměř žádné permanentní dipólové momenty. Příkladem zmíněné látky může být např. polyetylen. Z technologických důvodů se ovšem v praxi nevyhneme i použití některých slabě polárních polymerních směsí (např. plášťových materiálů). Vybrané elektrické parametry kabelů jsou v každé kabelovně průběžně ověřovány v různých stádiích výroby, čímž se kontroluje správnost výrobního technologického postupu. Ostatní, zejména dielektrické vlastnosti použitých izolačních materiálů se měří ve fázi vývoje či zařazení nového materiálu do výroby.

**Elektrický odpor (tzv. činný odpor jádra)** se měří při každé výstupní kontrole kabelů. Jedná se o elektrický odpor vodivého jádra – nejčastěji mědi. Jeho maximální hodnoty jsou pro jednotlivé průřezy stanoveny normou ČSN 60228 „*Jádra izolovaných kabelů*“ a např.

Analýza dějů provázejících tepelný rozklad kabelové izolace

pro průřez mědi  $1,5 \text{ mm}^2$  plného jádra třídy 1<sup>2</sup> je v normě uvedená maximální hodnota  $12,1 \text{ } \Omega/\text{km}$ . V kontextu této dizertační práce je nutné zabývat se také teplotní závislostí elektrického odporu. V určitém rozmezí teplot se elektrický odpor zvyšuje lineárně se zvyšující se teplotou. Tento interval se pro měď, zlato a stříbro pohybuje v rozmezí teplot  $-200$  až  $600 \text{ } ^\circ\text{C}$  [34]. V tomto teplotním intervalu je teplotní závislost elektrického odporu dána následujícím vztahem:

$$R_t = R_{20} [1 + \alpha_R (t - 20)], \quad (3)$$

kde  $R_{20}$  je odpor při teplotě  $20 \text{ } ^\circ\text{C}$ ,  $\alpha_R$  je teplotní koeficient elektrického odporu ( $\alpha_R$  mědi je  $0,00393 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  [35]) a  $t$  je teplota.

Odborná literatura se běžně nezabývá vývojem elektrického odporu mědi mimo zmíněný teplotní interval ( $-200$  až  $600 \text{ } ^\circ\text{C}$ ). Lze se pouze domnívat, že se bude elektrický odpor mědi za teplot vyšších než  $600 \text{ } ^\circ\text{C}$  zvyšovat nelineárně.

**Izolační odpor** ( $R_{iz} / \Omega$ ) je nejdůležitější parametr pro monitorování izolačního stavu kabelů. Jedná se o odpor, který musí překonat tzv. prosakující proud při průchodu izolantem. Izolační odpor závisí na geometrickém uspořádání měřeného systému, jeho vztah pro výpočet je následující [36]:

$$R_{iz} = \rho \frac{t}{A}, \quad (4)$$

kde  $t$  je tloušťka izolačního materiálu v cm,  $A$  je průřez izolantu v  $\text{cm}^2$  a  $\rho$  je rezistivita dielektrika v  $\Omega \cdot \text{cm}$ . Jak ze vztahu vyplývá, izolační odpor je přímo úměrný rezistivitě, nepřímo úměrný povrchu a délce vodiče a je závislý na tloušťce izolace. Porovná-li se vliv délky žíly na elektrický odpor vodiče a izolační odpor, vyplývá následující skutečnost: se zvětšováním délky žíly narůstá elektrický odpor vodiče, ovšem izolační odpor se ve stejném poměru zmenšuje. Obecně závisí izolační odpor na mnoha faktorech (např. na chemickém složení, na způsobu zpracování materiálu, na provozní teplotě), ale pro všechna dielektrika platí, že izolační odpor klesá se zvyšující se teplotou [37].

**Rezistivita** ( $\rho / \Omega \cdot \text{cm}$ ), neboli měrný elektrický odpor, je veličina charakterizující schopnost určité látky vést elektrický proud. Jedná se o materiálovou konstantu, která charakterizuje elektrickou vodivost látky, rezistivita mědi je  $1,72 \cdot 10^{-6} \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$  [35]. Čím menší je rezistivita, tím větší je vodivost dané látky. Čím větší je rezistivita látky, tím větší je její elektrický odpor.

---

<sup>2</sup> Třída 1 odpovídá plnému jádru, další třídy představují různě laněná jádra

**Elektrická vodivost** ( $G/S$ ) [38] je převrácená hodnota elektrického odporu, nazývá se také svod. Vodivost v nepolárních polymerních materiálech je způsobena iontovým charakterem nečistot a přísad, které se mohou disociovat na ionty. V případě polárních polymerů mohou k vodivosti přispívat i disociované molekuly z vlastního izolačního materiálu. Na druhou stranu vodivost také silně závisí na přítomnosti vlhkosti, a proto bývá pozorováno zhoršení izolačních vlastností po přidání určitých typů plniv [39].

**Konduktivita** ( $\gamma/S\cdot m^{-1}$ ) je převrácená hodnota rezistivity. Jedná se tedy o měrnou elektrickou vodivost, pro měď je její hodnota  $0,58\cdot 10^6 S\cdot m^{-1}$ . Konduktivitou polymerů se ve svých skriptech zabývá např. Mleziva [27]. Uvádí, že jejich elektrická vodivost má iontový charakter a silně závisí na čistotě materiálu, úrovni jeho polarizovatelnosti a teplotě. Cizí ionty se v polymerech vyskytují ve formě zbytků katalyzátorů, monomerů či nízkomolekulárních reakčních produktů. Dále popisuje, že polární polymery vykazují mnohem výraznější pokles rezistivity vlivem zvýšené teploty, než je tomu u polymerů nepolárních. Ve sklovitém stavu se polymery vyznačují vysokou rezistivitou. Zvýšením teploty nad teplotu skelného přechodu však roste jejich elektrická vodivost následkem větší pohyblivosti vázaných nosičů náboje.

**Polarizovatelnost** je schopnost molekuly změnit se v elektrický dipól; jinými slovy se jedná o schopnost dielektrika polarizovat se [40]. Polarizace v dielektriku vzniká jeho vložením do elektrického pole. U nepolárních dielektrik probíhá polarizace formou posunutí elektronů vůči kladným atomovým jádrům a polarizace se pak nazývá deformační. U polárních dielektrik se uplatňují ještě permanentní dipólové momenty, které se po vložení do elektrického pole za nějakou dobu natočí v jeho směru. Přidání anorganických plniv do polymerní směsi se projeví mezivrstvou a mezipovrchovou polarizací na hranici fází [27]. Tyto polarizace nesledují změny elektrického pole okamžitě, ale s určitým zpožděním, které se nazývá relaxační doba. Tento druh polarizace je proto nazýván relaxační polarizací.

**Elektrické pole** kabelu je charakterizováno silou, která působí na elektrický náboj v tomto poli umístěný. Takto popisuje základní definici Buchlovský a spol. ve svých rozsáhlých skriptech [38], která jsou jako jedna z mála publikací zaměřena výhradně na kabely. Další odstavce o elektrickém poli kabelu čerpají právě z této stěžejní publikace.

Tvar či směr elektrického pole bývá graficky prezentován pomocí ekvipotenciálních ploch a orientovaných silových čar (siločar). Ekvipotenciální plochy představují množiny bodů v prostoru o stejném elektrickém potenciálu. Siločáry jsou křivky, které jsou kolmé

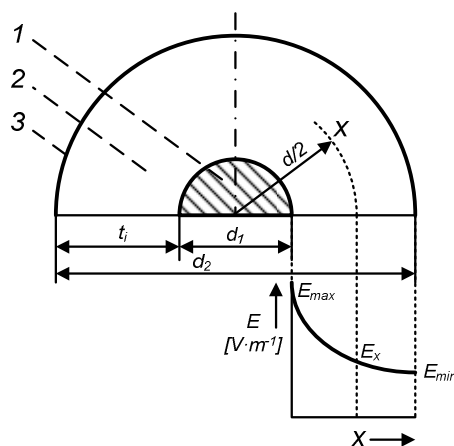
### Analýza dějů provázejících tepelný rozklad kabelové izolace

na ekvipotenciální plochy a charakterizují směr intenzity elektrického pole. Jejich hustota udává velikost intenzity elektrického pole ( $\vec{E}$   $[\text{V}\cdot\text{m}^{-1}]$ ). Intenzita elektrického pole je vektorová veličina udávající podíl síly působící v daném místě elektrického pole na náboj a platí pro ni:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}, \quad (5)$$

kde  $F$  je elektrická síla (N) působící na náboj  $q$  udávaný v C.

Přiloží-li se na jádra kabelů elektrické napětí, v jejich izolacích se vytvoří elektrické nehomogenní pole. Intenzita takového pole bude však v kruhové izolaci kabelové žíly rozložena značně nerovnoměrně. Největší hodnotu intenzity elektrického pole bude vykazovat povrch vodivého jádra, jak ukazuje obr. 14. Naopak nejmenší hodnota bude na vnějším povrchu izolace.



Obr. 14: Průběh intenzity elektrického pole ve stíněném jednožilovém kabelu (1 – vodivé jádro; 2 – izolace; 3 – kovový plášť/stínění;  $d_1$  – průměr vodivého jádra;  $d_2$  – průměr nad izolací;  $d$  – průměr v uvažovaném místě X;  $t_i$  – tloušťka izolace) [38]

Jednožilový kabel s vnějším stíněním svou konstrukcí odpovídá válcovému kondenzátoru. Proto si lze představit, že pro výpočet intenzity elektrického pole v jeho libovolném místě platí následující vztah:

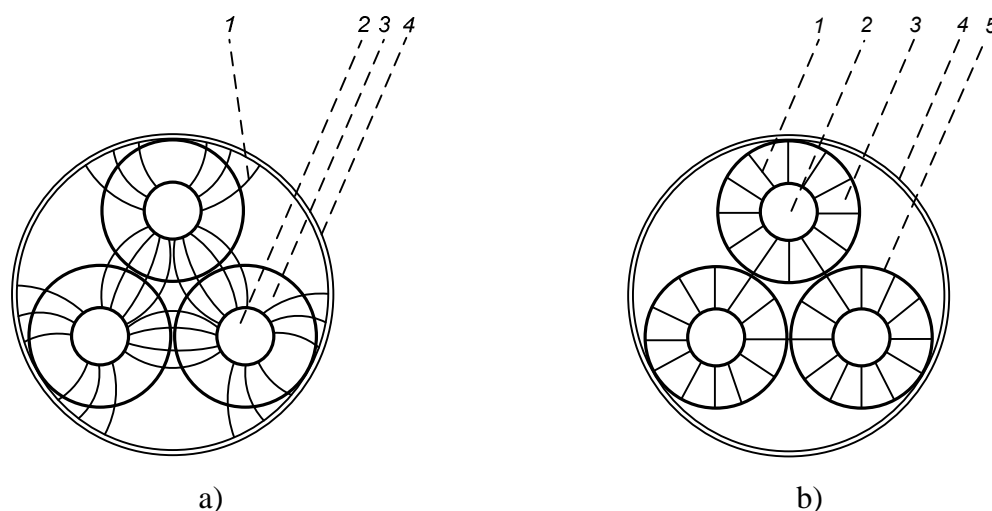
$$E_x = \frac{2U}{d \cdot \ln d_2/d_1}, \quad (6)$$

kde  $E_x$  je velikost intenzity elektrického pole v libovolném místě,  $U$  je napětí (V),  $d$  je průměr v uvažovaném místě (m),  $d_1$  je vnitřní průměr kabelu pod izolací (m), který odpovídá vnějšímu průměru vodivého jádra a  $d_2$  je vnější průměr izolace kabelu (m).

Obrázek 15 znázorňuje průběh siločar u třížilových kabelů s kruhovými jádry s nestíněnými a stíněnými žilami. Je zřejmé, že elektrické pole se projevuje u kabelu s nestíněnými žilami i v místech mezi žilami, kam při vytlačování pláště nezateče plášťový

Analýza dějů provázejících tepelný rozklad kabelové izolace

materiál. V těchto místech tak zůstávají dutiny, které jsou pak z izolačního hlediska nejslabšími místy kabelu. V těchto dutinách může docházet k tzv. částečným výbojům<sup>3</sup>, které postupně ničí izolaci a mohou vést až k elektrickému průrazu. Z tohoto důvodu se konstrukce s nestíněnými žilami používají pouze pro napětí do 6 kV.



Obr. 15: Průběh siločar u třížilového kabelu: a) s nestíněnými žilami, b) se stíněnými žilami (1 – silové čáry; 2 – vodivé jádro; 3 – izolace; 4 – kovový plášť; 5 – stínění) [38]

Pro napětí od 6 kV výše má tvar elektrického pole rozhodující důležitost. Proto se pro vyšší napětí používají kabely se stíněnými žilami s měděnou nebo hliníkovou fólií. Zde je opět rozhodující tvar vodivých jader. Kruhový průřez má při stejné ploše největší poloměr zakřivení a je proto z elektrického hlediska nejvýhodnější. Z téhož hlediska je nutné, aby byl povrch kabelu hladký a bez nerovností.

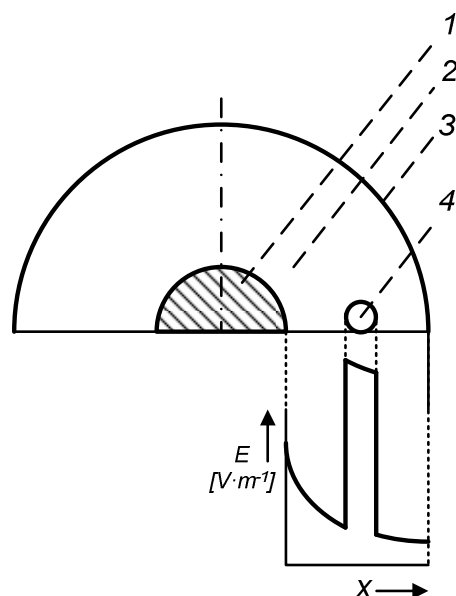
Na tvar elektrického pole má však vliv také relativní permitivita prostředí  $\epsilon_r$ . Čím větší je relativní permitivita izolace, tím menší je hodnota intenzity elektrického pole v něm působící. Tohoto jevu se využívá i u konstrukce kabelů pro vysoká napětí, kde se do blízkosti jádra (a tedy do míst s největší intenzitou elektrického pole) použije izolační materiál s větší relativní permitivitou a jako druhá izolace se použije materiál s menší permitivitou. Tím se dosáhne toho, že elektrické pole v izolaci je pak rozloženo rovnoměrněji. Podobně je možné vysvětlit zvýšení intenzity elektrického pole ve vzduchové bublince, která může při výrobě izolace vzniknout. Velikost intenzity elektrického pole ve vzduchové mezeře je tolikrát větší, kolikrát je relativní permitivita vzduchu menší v porovnání s relativní permitivitou okolní izolace. Tuto situaci zobrazuje

<sup>3</sup> Za částečné výboje jsou považovány elektrické výboje, které jen částečně přemostí izolaci, a to právě v místě vzduchové bublinky. V případě organických materiálů mají významné degradační účinky (elektrické, erozivní a tepelné) i v krátkodobých provozních intervalech [88]



Analýza dějů provázejících tepelný rozklad kabelové izolace

obr. 16. Protože vzduch má podstatně menší relativní permitivitu<sup>4</sup> než použité izolační materiály, představuje každá taková bublinka potenciální hrozbu. I při relativně nízkých intenzitách elektrického pole zde může docházet k částečným výbojům, které pak negativně působí na dielektrické vlastnosti izolantu.



Obr. 16: Vliv vzduchové mezery v izolaci na rozložení intenzity elektrického pole (1 – vodivé jádro; 2 – izolace; 3 – stínění; 4 – vzduchová mezera) [38]

## 5.2 Tepelná dekompozice a hoření polymerů

Vlastnosti všech polymerů jsou závislé především na teplotě. Podle tvaru makromolekul lze polymery rozdělit do tří skupin (lineární nerozvětvené, lineární rozvětvené a zesíťované), které pak vykazují různé chování vlivem zvyšující se teploty. Teploty, při kterých se mění vlastnosti polymerů, se nazývají přechodové a jedná se o následující:  $T_g$  - teplota zesíťování nebo také teplota skelného přechodu,  $T_f$  - teplota viskózního toku (pro amorfni plasty),  $T_m$  - teplota tání (pro semikrystalické plasty). Následující stručný přehled o struktuře plastů a procesech doprovázejících jejich rozklad při zvýšené teplotě a hoření čerpá odborné definice a poznatky z publikací [3], [27], [41]–[44].

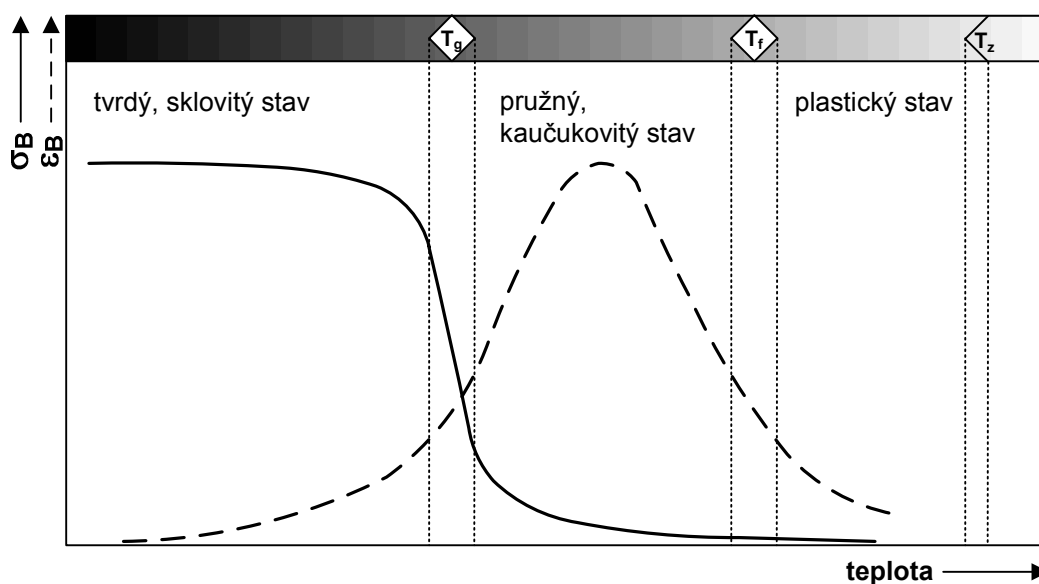
Amorfni plasty jsou takové, jejichž makromolekuly zaujímají zcela nahodilou pozici. Jejich struktura nejeví jakékoli známky uspořádanosti a jsou prakticky používány od teploty jejich zesíťování. Naproti tomu plasty krystalické (nebo spíše semikrystalické) vykazují určitý stupeň uspořádanosti, který se označuje jako stupeň krystalinity. Ten se běžně pohybuje od 40 do 90 % a vyjadřuje relativní podíl uspořádaných oblastí uložených

<sup>4</sup> Relativní permitivita vzduchu je 1,00054 [89]

Analýza dějů provázejících tepelný rozklad kabelové izolace

mezi oblastmi amorfními. Jejich praktická použitelnost je do dosažení teploty tání. Lineární molekuly (např. HDPE) vytváří, na rozdíl od rozvětvených molekul (např. LDPE), uspořádanější nadmolekulární strukturu a zesíťované makromolekuly (např. kaučuky nebo reaktoplasty) strukturu neuspořádanou. Termoplasty tak mohou mít amorfni nebo semikrystalickou nadmolekulární strukturu, zatímco reaktoplasty pouze strukturu amorfni.

U **amorfních plastů** se v okolí teploty skelného přechodu mění mechanické vlastnosti skokově (obr. 17), což závisí na velikosti mezimolekulárních sil a ohebnosti řetězců. Polymer zde přechází ze sklovitého do kaučukovitého stavu, ve kterém je deformace polymeru vratná.



Obr. 17: Průběh deformačních vlastností u amorfního plastu [41]

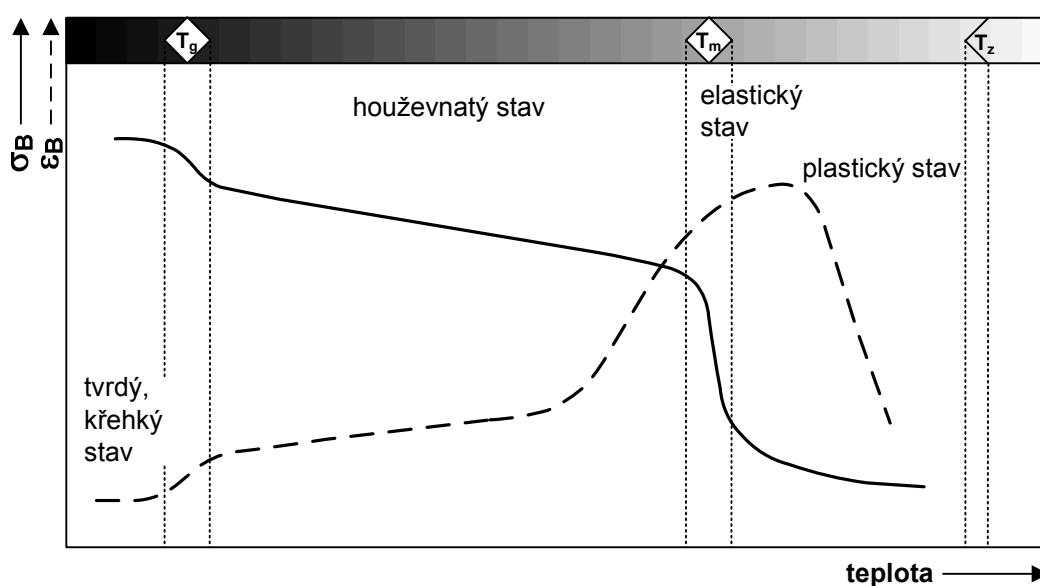
Při teplotě viskózního toku ztrácí hmota své kaučukovité vlastnosti a mění se ve vysoce viskózní kapalinu. Nad touto teplotou leží oblast zpracovatelnosti těchto materiálů a polymer se nachází v kapalném, tzv. plastickém stavu. Zvýšením teploty klesají makromolekulární síly a tím se viskozita taveniny snižuje. Při dalším zvyšování teploty již začne probíhat tepelná degradace polymeru (teplota  $T_z$ ).

**Zesíťované amorfni polymery** se v porovnání s lineárními chovají odlišně. Tuhá síť chemických vazeb neumožňuje přesuny makromolekul, a proto při vysokých teplotách lze u těchto látek najít jen určitou kaučukovitou oblast s relativně vysokým modulem pružnosti, jehož hodnota pak zůstává konstantní až do teploty rozkladu.

**Semikrystalické polymery** jsou charakterizovány teplotou tání nebo spíše intervalem teplot tání (obr. 18). V tomto intervalu dochází k rozpadu a tání krystalitů, což je provázeno

Analýza dějů provázejících tepelný rozklad kabelové izolace

změnou fáze hmoty, látka tedy přechází ze stavu tuhého do stavu kapalného. Tento přechod je náhlý, a to tím více, čím větší je procento jeho krystalické fáze. Konkrétní hodnota teploty tavení závisí na velikosti mezimolekulárních sil a na velikosti makromolekul. Zvětšení obou veličin pak zvyšuje i teplotu tání. Při zvýšení teploty lze na obr. 18 zaznamenat maximum křivky tažnosti, toto maximum koresponduje s hranicí soudržnosti materiálu, teplota rozkladu je však dostatečně daleko od teploty tání. Semikrystalické polymery díky procentu neuspořádanosti ve své struktuře vykazují i teplotu skelného přechodu. Při této teplotě se výrazně mění jejich vlastnosti, ovšem záleží na procentuálním podílu amorfnní fáze. Čím je procento amorfnní fáze menší, tím méně výrazně se tyto změny projeví.



Obr. 18: Průběh deformačních vlastností u semikrystalického plastu [41]

Tepelná dekompozice (rozklad) polymerů může pokračovat oxidačními procesy nebo jednoduše působením tepla. V mnoha polymerech je tepelný rozklad urychlen oxidanty (vzduch nebo kyslík). Pevné polymery podléhají při zahřívání jak fyzikálním, tak chemickým změnám, což obvykle vede k nežádoucím změnám jejich vlastností. Účinek tepla projevující se fyzikálním způsobem vede k měknutí polymeru případně až k jeho tání (kinetická energie řetězců se začne uplatňovat v takové míře, že převýší mezimolekulární síly, překonává je a plastická látka se projevuje jako kapalina). Chemická cesta tepelného účinku se pak projevuje změnou struktury polymeru, kdy se vysokomolekulární látky štěpí na nízkomolekulární produkty.

Chemická struktura plastů silně ovlivňuje jejich hořlavost. Hořlavé jsou zejména ty plasty, které se teplem rozkládají na hořlavé zplodiny. Přítomnost nehořlavých prvků (Cl,

Analýza dějů provázejících tepelný rozklad kabelové izolace

---

N, Si, P) v makromolekule plastů naopak hořlavost zmenšuje a zmenšuje i jejich samovznětlivost. Čím méně obsahuje polymer vodíku a kyslíku (v porovnání s uhlíkem), tím menší je jeho hořlavost. Nejběžnějším kritériem pro posuzování hořlavosti polymerů je stanovení limitního kyslíkového čísla podle ČSN ISO 4589-2 „*Plasty – Stanovení hořlavosti metodou kyslíkového čísla – Část 2: Zkouška při teplotě okolí*“ [45]. Limitní kyslíkové číslo je nejnižší koncentrace kyslíku ve směsi s dusíkem, při které testovaná látka ještě hoří. Čím nižší je kyslíkové číslo, tím je materiál hořlavější. Materiál se označuje jako zapalitelný, je-li jeho kyslíkové číslo menší než 26.

V případě požáru vede tepelný rozklad polymeru k jeho chemickému rozkladu, přičemž se z pevné látky začnou uvolňovat plynné výparry, které jsou schopné se nad touto pevnou látkou zapálit. Aby tento proces mohl být soběstačný, je pro hořící plyny nezbytné vrátit zpět materiálu dostatečné teplo, aby mohlo pokračovat další uvolňování plynných výparů či těkavých látek. Teplo přenesené zpět do polymeru způsobuje znovu uvolnění hořlavých těkavých látek, tyto látky reagují ve vzduchu nad polymerem s kyslíkem za vzniku tepla a část tohoto tepla je odváděna zpět k polymeru, aby mohl celý proces pokračovat. Chemické procesy odpovídají za vznik hořlavých par, zatímco fyzikální procesy jako tavení mohou značně pozměnit charakter hoření materiálu.

Pro zplyňování kapalin platí, že se jedná jednoduše o vypařování. U polymerů je situace značně složitější. Základní materiál je přirozeně netěkavý a jeho velké molekuly se nejdříve musí rozbít na menší fragmenty, které se pak mohou začít vypařovat. V mnoha případech se pevný polymer rozbije na mnoho menších fragmentů, které jsou ale složeny z různých chemických látek. Lehčí molekulové fragmenty se odpaří hned po svém vytvoření, zatímco ostatní těžší zůstanou v kondenzované fázi (pevné nebo kapalné) po nějakou dobu. Zatímco zůstávají v kondenzované fázi, mohou se tyto těžší molekuly podrobit dalšímu rozkladu na lehčí fragmenty, které se pak také snadněji odpaří. Některé polymery se rozštěpí tak dokonale, že po jejich hoření nezbyde žádný zbytek. Mnohem častěji se ale nepřemění všechno původní palivo na palivové páry a potom po hoření látka zanechá pevný zbytek. Tyto zbytky mohou být uhlíkaté, anorganické nebo kombinace obojího. Anorganické zbytky mohou tvořit křehké vrstvy, které jsou neprostupné pro těkavé látky, a chrání tak vrstvy pod sebou před dalším tepelným rozkladem. Kdyby se tyto anorganické vrstvy nevytvořily, čistě uhlíkaté zbytky by byly, později při vyšších teplotách, vždy spáleny.

### 5.3 *Elektrická vodivost ionizovaných plynů*

Plyny jsou za normálních podmínek velmi dobrými izolanty. Jak se tedy stane z dobrého izolantu dobrý vodič? Dobrý vodič obsahuje velké množství volných nosičů náboje, které je třeba v plynu nejprve vytvořit. Ty se vytvoří rozštěpením molekul plynu na kladné a záporné ionty, toto rozštěpení se nazývá ionizace a dosáhne se působením ionizačního činidla. Tím může být buď záření (UV, RTG,  $\gamma$ ) nebo vysoká teplota (plamen, topná spirála) [46]. Současně s ionizací a tedy rozbíjením molekul probíhá tzv. rekombinace neboli shlukování kladných a záporných iontů zpět do neutrálních molekul. Převažuje-li ionizace nad rekombinací, zvyšuje se počet volných nosičů náboje a tedy i vodivost plynu, pokud je tomu opačně, vodivost plynu se zmenšuje, až zanikne úplně.

Pokud se ionizovaný plyn nachází v elektrickém poli mezi dvěma elektrodami, při dosažení určitého stupně ionizovanosti plynu vznikne elektrický výboj jako důsledek pohybu volných nosičů náboje k opačně nabitým elektrodám.

Výboje lze rozdělit na samostatné a nesamostatné. Samostatné výboje jsou schopny sami udržovat pomocí nárazové ionizace potřebný počet volných nosičů náboje a jejich existence je tedy nezávislá na vnějším ionizátoru. Během nárazové ionizace probíhá štěpení molekul nárazem nabitě částice, která je elektrickým polem urychlena natolik, že je schopná tuto molekulu rozštěpit na další nabitě částice. Jejich počet se pak zvětšuje lavinovitě. Nesamostatný výboj je výboj, který je na vnějším ionizátoru závislý a pokud přestane působit, převládne rekombinace a výboj uhasne. Vysoce ionizovaný plyn je nazýván plazma, hustota kladných i záporných částic v něm je prakticky stejná a jeví se tak navenek jako elektricky neutrální.

Plamen je považován za určitou formu plazmatu – nízkoteplotní a slabě ionizované plazma. Vloží-li se tedy plamen do elektrického pole, lze v tomto prostředí změřit určitou elektrickou vodivost způsobenou pohybem volných nosičů elektrického náboje. Hodnota této vodivosti samozřejmě závisí na složení prostředí – jaký plyn tímto plamenem hoří a na jaké ionty je rozkládán. Klaus a spol. [47] se zabývali sledováním vodivosti plamene ze směsi metanu a kyslíku pomocí elektrod umístěných v plameni. Zjistili, že vodivost také závisí na uspořádání elektrod i jejich polaritě. Podobnou studii se zabýval i J. van den Boom a kol. [48]. Mimo jiné zjistil, že změna rychlosti hoření (stimulovaného elektrickým polem) roste exponenciálně s přiloženým napětím a závisí na vzdálenosti elektrod. Belhi a kol. [49] navrhl jednoduchý model sledující vliv elektrického pole na stabilizaci plamene. Jejich simulace ověřila domněnky, že přítomnost elektrického pole skutečně stabilitu

Analýza dějů provázejících tepelný rozklad kabelové izolace

---

plamene zlepšuje. V jejich článku [49] jsou navrženy i další postupy pro upřesnění výsledků této práce a směry, kam by se mohl další vývoj ubírat. Fialkov ve své práci [50] uvádí velice rozsáhlou studii zaměřenou na výzkum iontů v plameni. Popisuje metody a zařízení potřebné pro zkoumání nabitých částic v plameni, uvádí obecné charakteristiky elektrických vlastností plamene, charakterizuje ionizační procesy v plameni pro různé hořící plyny a zjišťuje iontové složení a chování plamene.

Ve smyslu této disertační práce je důležitý fakt, že plamen významným způsobem přispívá k tvorbě vodivého prostředí. Přiložením plamene na vzorek kabelu, který je připojen do elektrického obvodu, dochází nejprve (v několika málo minutách) k odhoření veškerých organických částí jeho izolace, ihned poté se díky plameni vytváří do určité míry vodivé prostředí mezi jeho žilami, které jsou po zbytek testu (fyzicky) izolovány již jen nehořlavou anorganickou vrstvou. Jak bude ve zbytku této práce ukázáno, právě vodivost plamene hraje při testování kabelů za podmínek požáru nezanedbatelnou roli.

## 6 Popis experimentu

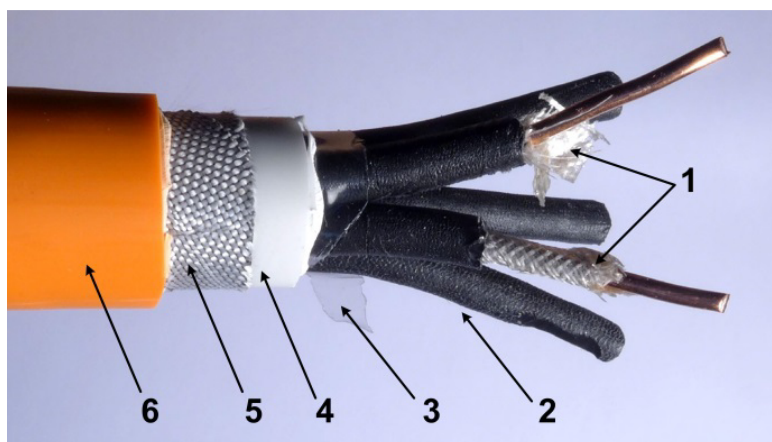
Pro ověření vypovídací schopnosti i praktické využitelnosti navrhované modifikace normy ČSN IEC 60331-21 byly v rámci experimentální části této práce testovány dva zcela odlišné typy ohniodolných kabelů. Pozornost byla zaměřena na nejčastěji používané konstrukce využívané pro ohniodolné instalace. Oba typy kabelů byly podrobeny požární zkoušce za podmínek definovaných normou ČSN IEC 60331-21 s využitím testovacího zařízení, jehož podrobný popis je obsahem normy ČSN IEC 60331-11. Měřicí obvod byl nad rámec běžných doporučení upraven tak, aby bylo možno po celou dobu testu kontinuálně měřit a zaznamenávat izolační odpor kabelové izolace. Testované kabely nebyly v průběhu zkoušky pod zatížením, ale v obvodu byl po celou dobu zapojen přístroj pro měření izolačního odporu.

### 6.1 Zkoušené kabely a jejich konstrukce

Jak již bylo řečeno, každá z vybraných kabelových konstrukcí pracuje se zcela odlišným způsobem retardace hoření. Z pohledu retardace hoření je možno za stěžejní část kabelové konstrukce považovat tzv. ohniodolnou bariéru. V rámci provedených experimentů byly testovány kabely obsahující ohniodolnou bariéru buď ve formě skloslídové pásky či tvořenou pomocí žilové izolace vyrobené z keramizujícího silikonového kaučuku. Obě zmíněné konstrukce budou podrobně popsány v následujícím textu.

#### 6.1.1 Kabel se skloslídovou páskou

Upravené požární zkoušce byl jako první podroben silový pětižilový kabel s označením 1-CXKE-V 5x1,5 (obr. 19).



Obr. 19: Fotografie testovaného kabelu se skloslídovou páskou

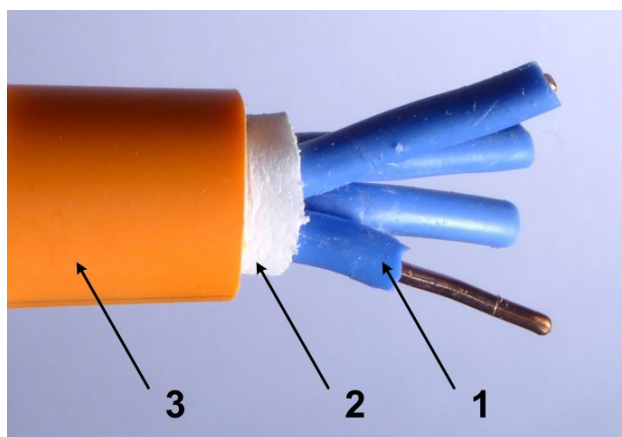
Analýza dějů provázejících tepelný rozklad kabelové izolace

Jako vodivé jádro byla použita měď třídy I. (plné jádro) s průřezem  $1,5 \text{ mm}^2$ . Jednotlivá jádra žil byla ovinuta dvěma vrstvami skloslídové pásky s 50% překrytím. Skloslídová páska je slídový papír (vyrobený z flogopitu) vyztužený tkaninou ze skelných vláken. Tato páska tvoří v kabelu základní izolační vrstvu a ohniodolnou bariéru, která i po odhoření organických vrstev kabelu zůstává jako anorganická izolační vrstva a zachovává jeho funkčnost. Izolace žíly je tvořena extrudovaným a zesíleným polyetylenem (XLPE). Jedná se o nejrozšířenější typ kabelové izolace. Kromě výborných dielektrických parametrů umožňuje zesílená struktura XLPE použití kabelu za vyšších provozních teplot, než by tomu bylo v případě použití klasických termoplastů (PVC, PE).

Duši kabelu tvoří pět žil stočených „Z“ zkrutem (délka zkrutu 230 mm). Tento celek je následně omotán separační polyesterovou páskou PET (3) s překrytím 20 %, která zprostředkovává snadné oddělení výplně od duše kabelu. Výplň kabelu (4), extrudována přímo na separační PET pásku, představuje zástupce široké skupiny termoplastických nízkodýmivých HFFR směsí. Nosnou součástí této polymerní směsi je kombinace LDPE (nízkohustotní polyetylen) a EVA (kopolymer polyetylenu a vinylacetátu). Výplňová směs je také plněna retardérem hoření, v tomto případě hydroxidem hlinitým, ze 40 %. Směs odpovídá požadavkům normy DIN VDE 0207 (typ směsi HM4) a v případě požáru vytváří ohniodolnou bariéru. Výplň je dále ovinuta ohniodolnou (tzv. FR, z angl. Fire Resistant) páskou (5) s překrytím 20 %. Ta je tvořena skelnou tkaninou z jedné strany potaženou oheňretardující, bezhalogenovou a nízkodýmivou zesílenou akrylovou pryskyřicí. Vnější plášť (6) je extrudován přímo na ohniodolnou FR pásku za použití stejné směsi jako pro výplň (navíc s přídavkem oranžového barviva).

**6.1.2 Kabel izolovaný silikonovým kaučukem**

Druhým testovaným kabelem je silový kabel s označením 1-CSKE-V 4x1,5 (obr. 20).



Obr. 20: Fotografie testovaného kabelu izolovaného silikonovým kaučukem

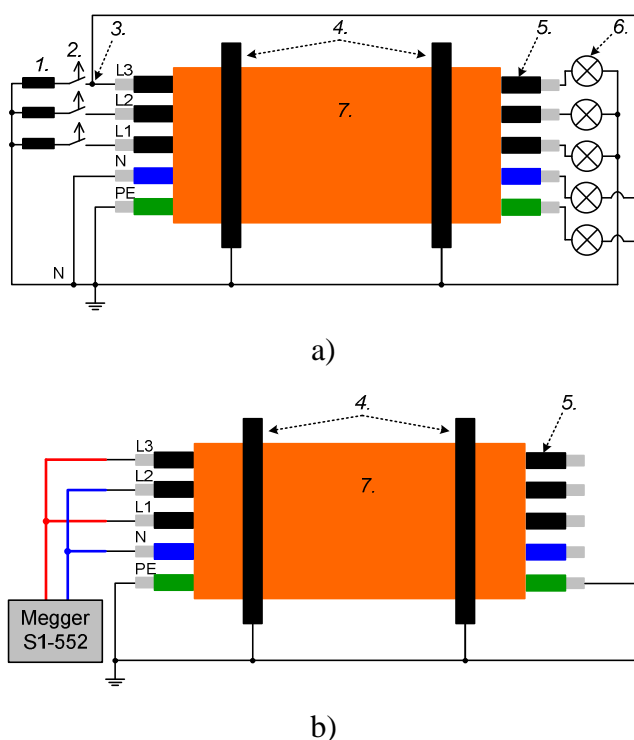


## Analýza dějů provázejících tepelný rozklad kabelové izolace

Měděná jádra (stejná jako u předchozí konstrukce) jsou v tomto případě izolována extrudovaným keramizujícím silikonovým kaučukem (1) na bázi polydimetylsiloxanu (PDMS), který vytváří při hoření na měděném jádře stabilní vrstvu popela. Žíly jsou stočeny S-Z zkrutem (délka zkrutu 205 mm) do kabelové duše. Pro výplň (2) a plášť (3) byl použit stejný HFFR materiál jako v předchozím případě. Pouze výplňová směs je u tohoto typu kabelu plněna z více procent (70 %) retardérem hoření (ATH) než je tomu u kabelového pláště.

### 6.2 Popis měřicí metody

Jak již bylo zmíněno výše, pro účely této práce byla měřicí metoda podle normy ČSN IEC 60331-21 mírně modifikována a to tak, aby bylo možno po celou dobu požární zkoušky kontinuálně odečítat izolační odpor mezi žilami. Kabel nebyl zatížen, ale po celou dobu zkoušky byl měřen izolační odpor pomocí přístroje MEGGER S1-552 s připojeným střídavým napětím 1500 V. Obr. 21a představuje zapojení předepsané normou, obr. 21b pak použitou variantu zapojení s měřicím přístrojem MEGGER S1-552.



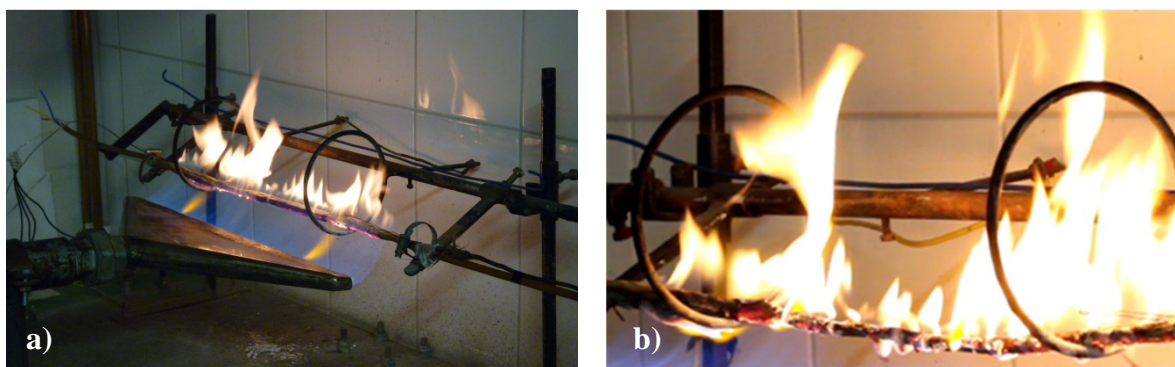
Obr. 21: Zapojení obvodu: a) obecné zapojení dle normy ČSN IEC 60331-21 [51];  
b) zapojení s přístrojem pro měření izolačního odporu (Megger S1-552)

Na uvedených obrázcích můžeme vidět následující části obvodu: 1 – transformátor, 2 – jistič, 3 – připojení fáze L3 (nebo L1 nebo L2), 4 – podpěrné kroužky, 5 – testovaná žíla, 6

Analýza dějů provázejících tepelný rozklad kabelové izolace

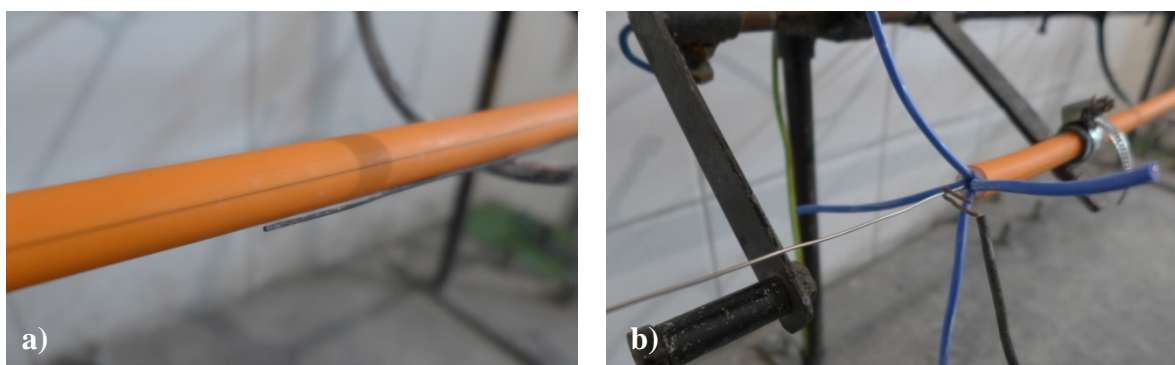
– zatížení a indikační zařízení (žárovky), 7 – testovaný vzorek kabelu,  $L1$ ,  $L2$ ,  $L3$  – fázové vodiče,  $N$  – nulový vodič,  $PE$  – ochranný vodič.

Kabel byl v průběhu zkoušky vystaven plameni z propan-butanového hořáku s teplotou minimálně 750 °C po dobu 90 minut. Podmínky panující v průběhu zkoušky přehledně demonstuje obr. 22. Časové požadavky na zkoušku byly zachovány stejné, jako v normě, a tak byl izolační odpor zaznamenáván i 15 minut po vypnutí hořáku - tedy v době chladnutí.



Obr. 22: Požární test podle ČSN IEC 603331-21: a) obecné uspořádání měření; b) obrázek kabelu v čase testu 0:00:45

Pro snazší interpretaci naměřených dat a pro potvrzení či vyvrácení některých pracovních hypotéz byly během požárního testu použity také dva termočlánky (typu K) a to způsobem, který byl popsán ve čtvrté kapitole. Jak je patrné z obr. 23a, jeden termočlánek byl umístěn podél kabelového pláště tak, aby kontinuálně zaznamenával jeho teplotu. Druhý termočlánek byl vsunut doprostřed duše kabelu mezi kabelové žíly (viz obr. 23b). Díky těmto termočládkům mohla být odečítána teplota a sledován její vývoj jak na povrchu, tak i přímo uvnitř kabelu.



Obr. 23: Umístění termočládků v testovacím uspořádání: a) termočlánek umístěný podél pláště; b) termočlánek umístěný uvnitř kabelu

Z důvodu zajištění co nejvyšší vypovídací schopnosti zkoušky a zároveň přijatelného objemu naměřených dat bylo měření rozděleno do čtyř po sobě jdoucích časových segmentů lišících se různou četností zaznamenávání naměřených hodnot. První segment

Analýza dějů provázejících tepelný rozklad kabelové izolace

začíná okamžikem přiložení plamene (tedy v čase 0:00:00) a trvá celkem 10 minut. Protože právě v tomto časovém úseku probíhá mnoho velmi zajímavých dějů, byly naměřené hodnoty zaznamenávány každých 5 vteřin. Druhý časový segment odpovídá zbytku doby přiložení plamene, tedy 80 minutám. V tomto intervalu se měřené hodnoty příliš nemění, proto bylo plně dostačující odečítat je každou minutu. Tento časový segment končí okamžikem vypnutí hořáku, tedy uhašením plamene. Dle normy ČSN IEC 603331-21 následuje 15 minutový interval chladnutí vzorku, pro naše účely rozdělený do dvou časových segmentů (segment č. 3 a 4). Vzhledem k tomu, že po vypnutí hořáku izolační odpor intenzivně rostl, byly hodnoty během třetího segmentu odečítány opět každých 5 vteřin a to po dobu 10 minut. Zbývajících 5 minut zkoušky je označeno jako segment č. 4. V této části byly měřené hodnoty izolačního odporu opět ustáleny, proto stačil interval odečítání hodnot po jedné minutě. Pro rychlou orientaci jsou popsány segmenty stručně shrnuty také v tab. 2.

*Tab. 2: Popis jednotlivých časových segmentů modifikované zkoušky*

	Segment 1	Segment 2	Segment 3	Segment 4
doba trvání [min]	10	80	10	5
interval odečítání hodnot [s]	5	60	5	60

Výše popsaným způsobem byly analyzovány od každého typu kabelu celkem 3 vzorky (tj. četnost měření  $n=3$ ).

### **6.3 Popis soustavy kontinuálně zaznamenávající data**

Kromě již popsaných částí měřicího systému je nutné také zmínit, jakým způsobem byla data s uvedenou četností zaznamenávána. Pro tyto účely byl využit modulární, volně programovatelný logický automat (PLC, z angl. Programmable Logic Controller) Tecomat Foxtrot ve funkci dataloggeru. Tecomat Foxtrot je výrobek českého výrobce, firmy Teco a.s. používaný nejen pro průmyslové aplikace, ale i pro speciální použití. Sestava PLC obsahuje centrální modul Tecomat Foxtrot CP-1005 a periferní modul IT-1602 pro připojení až osmi termočlánků. Pro účely plánovaných experimentů byl do PLC nahrán aplikační program s funkcí dataloggeru, který byl vyvinut a nastaven tak, aby splňoval zadání experimentu.

Jak již bylo řečeno, při prováděných experimentech byl vzorek kabelu napájen přístrojem pro měření izolačního odporu MEGGER S1-552 stejnosměrným zkušebním

## Analýza dějů provázejících tepelný rozklad kabelové izolace

---

napětím o velikosti 1500 V. S využitím zabudovaného sériového rozhraní RS-232 je možno z tohoto přístroje získávat v pravidelných intervalech jedné vteřiny aktuální data (měřené napětí, čas měření, protékající proud, izolační odpor a další zvolené parametry). Ta byla přiváděna na sériový port RS-232 centrálního modulu PLC Tecomat Foxtrot, který je následně zpracoval do souboru ve formátu \*.csv společně s aktuálními informacemi o teplotě, která byla měřena oběma termočládky. Vytvořený soubor obsahuje také časovou značku průběhu experimentu.

### **6.4 Termické analýzy**

Termogravimetrická analýza (TGA) byla použita na analýzu všech vrstev kabelové izolace za účelem získání prvotního pohledu na chování těchto látek během jejich tepelného rozkladu. Vzorky ( $2\pm 0,1$  mg) byly umístěny do platinového kelímku a vystaveny lineárnímu teplotnímu ohřevu s rychlostí  $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$  v teplotním intervalu od pokojové teploty ( $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) do  $850\text{ }^{\circ}\text{C}$  v atmosféře vysušeného vzduchu ( $100\text{ ml}/\text{min}$ ). Analýzy byly provedeny na přístroji pro simultánní termickou analýzu TGA/DSC s označením SDT Q600 od společnosti TA Instruments.

TGA byla provedena dvěma způsoby:

- nejprve zvlášť pro každý izolační materiál vyskytující se v konstrukci kabelu se zmíněnou navázkou  $2\pm 0,1$  mg a
- na všech izolačních materiálech současně umístěných do jednoho kelímku v přesném procentuálním podílu odpovídajícím skutečnému zastoupení v kabelové konstrukci. Celková hmotnost takto naváženého vzorku byla  $20\pm 0,1$  mg.

Hmotnostní poměry jednotlivých komponent kabelové konstrukce byly vypočteny na základě přesného vážení každé složky samostatně pomocí laboratorní váhy Radwag XA.R2. V podmínkách reálného požáru jsou samozřejmě jednotlivé části kabelu vystaveny různým rychlostem ohřevu, což závisí na mnoha faktorech ovlivňujících rozvoj a šíření požáru. Zároveň jsou jednotlivé vrstvy namáhány teplem postupně, podle toho, v jaké vrstvě jsou v kabelu umístěny. Nicméně tato měření byla provedena za účelem získání alespoň základní představy o chování jednotlivých konstrukcí kabelů navzdory těmto skutečnostem.

Diferenční skenovací kalorimetrie (DSC) byla provedena pouze pro materiál vnějšího pláště kabelu, a to v podmínkách velice rychlého ohřevu (s rychlostí  $60\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ) pro lepší porozumění jeho chování po dosažení teploty tání. Důvodem takto zvolené rychlosti ohřevu

## Analýza dějů provázejících tepelný rozklad kabelové izolace

---

bylo co nejvíce se přiblížit podmínkám, které při zkoušce nastanou po přiložení plamene. DSC analýza byla provedena na přístroji DSC Q2000 společnosti TA Instruments. Vzorek o hmotnosti ( $2 \pm 0,1$  mg) byl umístěn do hliníkového kelímku s dírkou ve víčku a podroben lineárnímu teplotnímu ohřevu od 0 °C do 400 °C v atmosféře vysušeného vzduchu s průtokem 50 ml/min.

### **6.5 Měření elektrické vodivosti plamene použitého při zkoušce**

Ze samotné podstaty zkoušky i na základě teoretických poznatků uvedených v úvodních kapitolách této práce vyplývá, že právě vodivost plamene bude mít během zkoušky nezastupitelnou úlohu. První orientační testy ukázaly, že po té, co vnější ochranné vrstvy z extrudovaných polymerů rychle shoří a postupně z povrchu kabelu odpadnou, dostane se do přímého kontaktu s plamenem také izolace žil. Na tu začíná vysoká teplota působit s určitým zpožděním. Její organické části následně také velmi rychle degradují a sledovaný izolační stav kabelu je v tomto okamžiku nejmenší. V následujícím časovém segmentu (po dobu 80 minut) vykazuje měřený izolační odpor mezi žilami trvale o několik řádů sníženou hodnotu oproti počátečnímu stavu. To je způsobeno tím, že namísto nepolárního polymeru, který propouští za normální teploty pouze nepatrný prosakující elektrický proud, chrání po tuto dobu měděné žíly pouze skloslídová páska či zkeramizovaný silikon. Obě tyto vrstvy by za běžných provozních teplot měly velmi dobré izolační vlastnosti (s rezistivitou obvykle větší než  $10^{12} \Omega \cdot m$ ). Ovšem, je nutné si uvědomit, že prostředí v okolí vodivých jader je při zkoušce syceno plamenem vznikajícím hořením směsi propanbutanu okysličené okolním vzduchem. Tento plyn je vysokou teplotou rozkládán na ionty, které jsou v elektrickém poli přitahované k elektrodám opačné polarity, což se obecně projevuje jako elektrický proud. V tomto případě se tedy předpokládá, že přiložený plamen bude značně přispívat ke zvýšené hodnotě prosakujícího elektrického proudu a tedy ke snížené hodnotě izolačního odporu.

Pro dokázání této domněnky jsme do stejného plamene vložili dva odholené měděné vodiče ve vzdálenosti 2 mm a po dobu 30 minut jsme zaznamenávali izolační odpor mezi nimi při zachování stejného napětí jako při zkoušce (1500 V). Přístroj pro měření izolačního odporu byl připojen i po vypnutí hořáku a hodnoty izolačního odporu byly zaznamenávány i během chladnutí mědi až do ustálení.

## 7 Rozbor získaných výsledků

Popis získaných výsledků je pro větší přehlednost rozdělen do dvou podkapitol. První z nich se zabývá interpretací chemické podstaty rozkladných reakcí při zatížení vzorků kabelů vysokou teplotou. Druhá se zaměřuje na popis vzájemných souvislostí mezi těmito degradačními jevy a samotným vývojem izolačního odporu kabelu v podmínkách požáru.

### 7.1 Chování kabelových izolací v podmínkách požáru z hlediska jejich struktury

S ohledem na to, že hlavní podstatou experimentální části práce je popis dvou konstrukčně zcela odlišných typů kabelů, bude tato kapitola rozdělena pro snazší orientaci čtenáře do dvou dílčích, právě dle těchto typů.

#### 7.1.1 Kabel se skloslídovou páskou

Jak bylo popsáno výše, testované kabely jsou složeny z několika různých izolačních vrstev, které pouze při společném použití zajišťují jak ochranu proti požáru, tak nepřetržitý provoz kabelu.

K získání základního pohledu na strukturní chování jednotlivých izolačních vrstev při tepelném rozkladu kabelu byla použita TGA. Jak již bylo uvedeno v předchozí kapitole, kromě měření jednotlivých materiálů vrstev zvlášť, byla TGA použita i na souhrnnou analýzu všech komponent v jednom kelímku. Jejich konkrétní hmotnostní poměry k celkové hmotnosti kabelové izolace jsou uvedeny v tabulce 3.

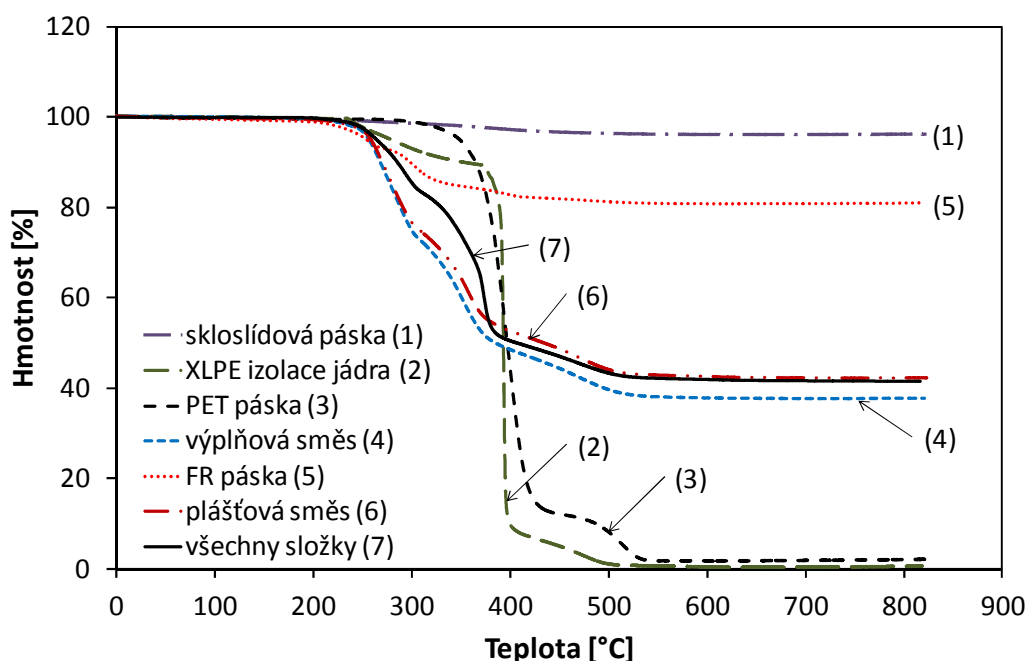
Tab. 3: Hmotnostní poměry jednotlivých složek k celkové hmotnosti kabelové izolace

Vrstva č.	Popis izolace	Hmotnostní poměr [hm%]
1	Skloslídová páska	7,66
2	Izolace jádra (XLPE)	15,61
3	Separáčnická páska (PET)	1,01
4	Výplň (LDPE/EVA s ATH)	32,27
5	Ohniodolná FR páska	3,46
6	Plášť (LDPE/EVA s ATH)	39,99

Jak bylo očekáváno, TGA analýza materiálů použitých v kabelové konstrukci (viz obr. 24) představila skloslídovou pásku jako nejvíce teplotně stabilní složku [52], [53]. Velmi mírný stupeň rozkladu probíhá v rozmezí teplot 230 – 500 °C (kdy ztratí 3,8 % své

### Analýza dějů provázejících tepelný rozklad kabelové izolace

hmotnosti), což by mohlo být přiřazeno k uvolnění polytetrafluor-etylenového maziva [54], [55] použitého k ochraně skelných vláken [56].



Obr. 24: TGA křivky všech materiálů vyskytujících se v kabelové konstrukci

TGA analýza materiálů použitých v kabelové konstrukci (viz obr. 24) potvrdila, že skloslídová páska je nejvíce teplotně stabilní složkou kabelové izolace. Velmi mírný stupeň jejího rozkladu probíhající v rozmezí teplot 230 – 500 °C (kdy páska ztratí 3,8 % své hmotnosti), by mohl být přisouzen uvolnění polytetrafluoretylenového maziva [54], [55] použitého k ochraně skelných vláken [56].

Skloslídová páska hraje velice důležitou roli během požáru, protože společně s oheňretardující výplní a pláštěm tvoří soudržnou elektroizolační a teplotně odolnou vrstvu, která chrání vodivá jádra od zkratu a zároveň i od jejich roztavení [57]. Z obr. 24 je také zřejmé, že výplňová i plášťová směs se rozkládá ve třech hlavních krocích v teplotních intervalech 200 – 335 °C, 335 – 415 °C a 415 – 550 °C. První pokles hmotnosti odpovídá tepelnému rozkladu ATH [12], zatímco druhý a třetí souvisí s termooxidační degradací polyolefinového systému LDPE/EVA [58]–[60]. Je všeobecně známo [58], [60], že termooxidační degradace neplněného polymeru LDPE/EVA probíhá ve dvou krocích, které mají tendenci se v oxidačním prostředí překrývat. První z nich se obvykle objevuje mezi 300 a 380 °C a odpovídá odštěpení vinyl acetátových skupin v etylen-vinyl acetátu a uvolňování kyseliny octové za vzniku dvojných vazeb. Druhý pokles (390 – 480 °C) je přičítán rozkladu uhlovodíkových řetězců.

Analýza dějů provázejících tepelný rozklad kabelové izolace

---

Na obr. 24 si lze si povšimnout, že jednotlivé kroky tepelného rozkladu polymeru LDPE/EVA plněného ATH jsou posunuty do vyšších teplot. Tento posun by mohl mít souvislost s překrýváním procesu rozkladu ATH a odštěpování acetátových skupin EVA, neboť bylo zjištěno [58], že plněním tohoto polyolefinového systému retardérem hoření ve formě ATH se mění kinetika rozkladné reakce a přibližně od 300 °C se rychlost rozkladu zvyšuje.

Také samotná ohniodolná FR páska podstatně přispívá k zajištění funkčních vlastností kabelu během požáru, jelikož drží pohromadě stočené kabelové žíly a zároveň má funkci ochranného štítu proti vysoké teplotě z vnějšího prostředí. Jak již bylo zmíněno, ohniodolná FR páska je složena ze skelné tkaniny z jedné strany potažené akrylovou pryskyřicí. Akrylové pryskyřice jsou obvykle používány pro navázání přísad zpomalujících hoření a slouží jako zdroj uhlíku v systémech, které teplem nabobtnávají [61]. Jak je možné pozorovat na TGA křivce ohniodolné FR pásky (obr. 24), rozklad akrylové pryskyřice probíhá v několika krocích v celkovém teplotním intervalu 200 – 600 °C, což je v souladu s výsledky Wanga a kol. [61]. Během tepelné degradace akrylové pryskyřice se zároveň odehrává i mnoho chemických reakcí mezi použitými retardéry hoření ve formě ATH, což vede ke zpomalení hoření akrylových pryskyřic a k tvorbě silnější vrstvy z nespálených anorganických zbytků (popela) [61], [62]. To přispívá společně se skloslídovou páskou a ochrannou vrstvou vzniklou shořením výplně a pláště k ochraně a elektrické izolaci vnitřní kabelové struktury před ohněm a vysokou teplotou.

Kromě výše uvedených dějů hraje velmi důležitou roli také rozklad samotné žilové izolace z XLPE a rozklad separační PET fólie. Z obr. 24 je zřejmé, že PET fólie se rozkládá v jednom hlavním kroku začínajícím při teplotě 380 °C a končícím při 480 °C, přičemž ztrácí 88 % své hmotnosti. Po hlavním rozkladném kroku zůstává uhlíkatý zbytek odpovídající asi 11 hm% , který se dále pomalu rozkládá v teplotním intervalu od 480 do 560 °C. Brems a kol. [63] uvádí podobné výsledky u rozkladu PET v atmosféře dusíku. Jeho výsledky se ovšem liší v rychlosti rozkladu uhlíkatého zbytku. Podle Yoshioky a kol. [64] vede tepelný rozklad PET při teplotách pod 510 °C k tvorbě širokého spektra látek, kde vystupují jako hlavní složky především kyselina benzoová, kyselina tereftalová, monometr-tereftalát a oxidy uhlíku.

TGA analýza izolace jádra z XLPE prokázala v oxidační atmosféře dvoukrokový rozklad v teplotních intervalech 260 – 400 °C (kdy ztrácí 11 hm%) a 400 – 440 °C (se ztrátou 82 hm%) následovaný rozkladem nespáleného zbytku o hmotnosti přibližně



Analýza dějů provázejících tepelný rozklad kabelové izolace

---

6,5 hm%. V atmosféře dusíku vykazuje XLPE jediný, hladký rozkladný krok, se kterým se lze často setkat v literatuře (např. [65]). Hinsen a kol. [66] tvrdí, že primární degradací PE je jeho náhodné štěpení. Na druhou stranu, degradace může vést také k rozvětvení polymerního řetězce. Štěpení i větvení se objevuje simultánně a vede tak k zobrazení jediného rozkladného kroku [67] na křivce TGA (v inertní atmosféře dusíku). Menší pozornost byla doposud věnována tepelnému rozkladu XLPE v oxidačním prostředí. Termooxidační degradace zaznamenaná na testované XLPE izolaci je charakteristická dvěma zajímavými jevy: velmi mírným nárůstem hmotnosti vzorku, který se objevuje těsně před samotnou degradací (na obr. 24 není při daném měřítku jasně rozeznatelný) a zejména pak prudkým úbytkem hmotnosti během druhého kroku degradace. Výsledkem je velice rychlá změna na křivce TGA (na křivce DSC se tato rychlá reakce obvykle projeví jen jako exotermická špička - zde není zobrazeno). Peterson a kol. [67] tvrdí, že zmíněný nárůst hmotnosti vzorku je pravděpodobně způsoben vytvořením malého množství oxidu z daného polymeru a rychlou degradací (druhý pokles) přisuzuje zapálení vzorku díky dosažení teploty 400 °C. Ta odpovídá zápalné teplotě mnoha karboxylových kyselin, které převládají v pozdějších fázích degradace XLPE. Dvoukrokový rozklad XLPE v atmosféře vzduchu taktéž popisuje Nóbrega a Alencar de Queiroz [68]. Jedná se o XLPE používané jako izolace žil pro kabely středního napětí.

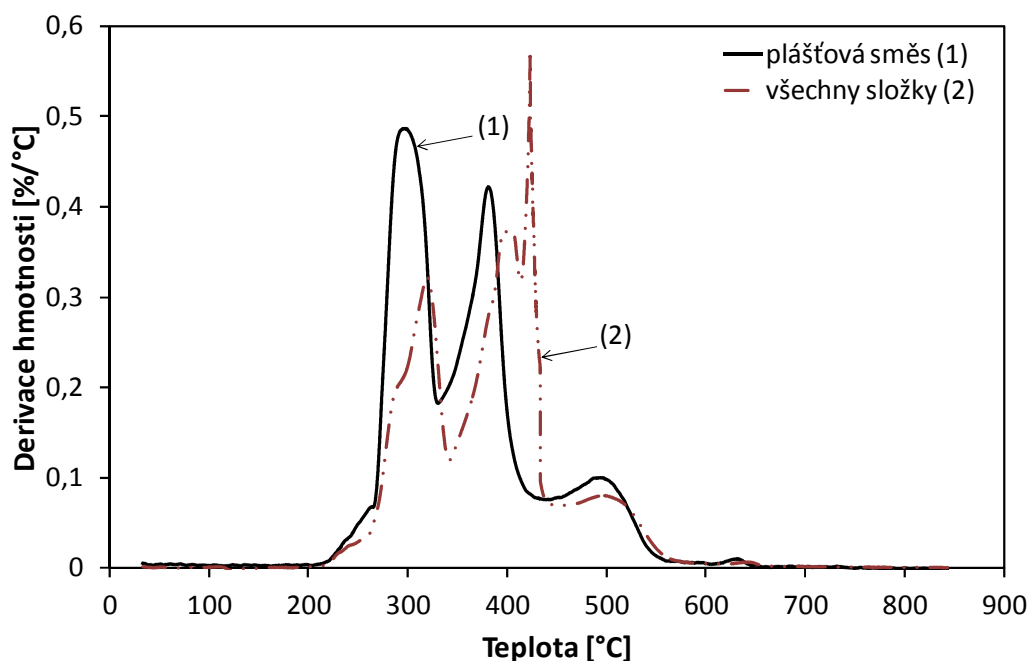
Jak vidíme z předchozího textu, při testování kabelové izolace termickými analýzami nelze otázku volby poplachového plynu opomíjet. Zatímco degradace polymerů bývá v odborné literatuře nejvíce studována v inertních atmosférách, studium degradace v prostředí s kyslíkem je stejně tak podstatné, neboť poskytuje praktické a důležité informace o tom, jak se bude polymer chovat v reálných (atmosférických) podmínkách [67]. Na druhou stranu, ani za reálných podmínek požáru nelze uvažovat o neustálém a neomezeném přísunu kyslíku ke všem vrstvám kabelové izolace. Jak již bylo řečeno, v průběhu rozkladu kabelové konstrukce se vytvářejí ochranné vrstvy tvořené anorganickými zbytky z plášťové a výplňové směsi a z ohniodolné FR pásky. Ty mohou následně zabraňovat přístupu kyslíku do níže položených vrstev. Separální PET páska a XLPE izolace jsou tedy s největší pravděpodobností rozkládány za omezeného přístupu vzduchu. Všechny tyto skutečnosti musejí být brány v úvahu při pozdější interpretaci naměřených dat.

Poslední křivka na obr. 24, v grafu nazvaná jako „všechny složky“, ukazuje celkový rozklad dosažený rozkladem všech výše popsanych složek umístěných společně v jednom

Analýza dějů provázejících tepelný rozklad kabelové izolace

kelímku. Souhrnná TGA křivka vykazuje tři dobře rozeznatelné rozkladné kroky v následujících teplotních intervalech: 210 – 340 °C, 340 – 425 °C a 425 – 590 °C. S ohledem na tyto teplotní intervaly a na fakt, že směs LDPE/EVA společně s ATH je použita jak na plášťovou, tak i na výplňovou směs, která je v izolaci zastoupena celkově ze 72 hm% (viz tab. 3) je zřejmé, že souhrnná křivka rozkladu je nejvíce ovlivněna právě rozkladem těchto složek.

Pro detailnější objasnění vztahu mezi společným rozkladem všech složek a rozkladem směsi LDPE/EVA+ATH je na obr. 25 vynesena také derivace hmotnosti v závislosti na teplotě (DTG, derivační termogravimetrie) pro plášťovou směs a pro „všechny složky“. Je zřejmé, že rozklad skloslídové pásky, XLPE izolace, separační PET pásky a ohni odolné FR pásky zpomaluje rychlost úbytku hmotnosti při souhrnném rozkladu všech složek najednou a posouvá všechny zaznamenané efekty do vyšších teplot. Špičatý pík při teplotě 420 °C může být přisouzen zmíněnému zapálení XLPE izolace v kelímku.



Obr. 25: DTG křivky plášťové směsi a rozkladu všech složek použitých v kabelu

### 7.1.2 Kabel izolovaný silikonovým kaučukem

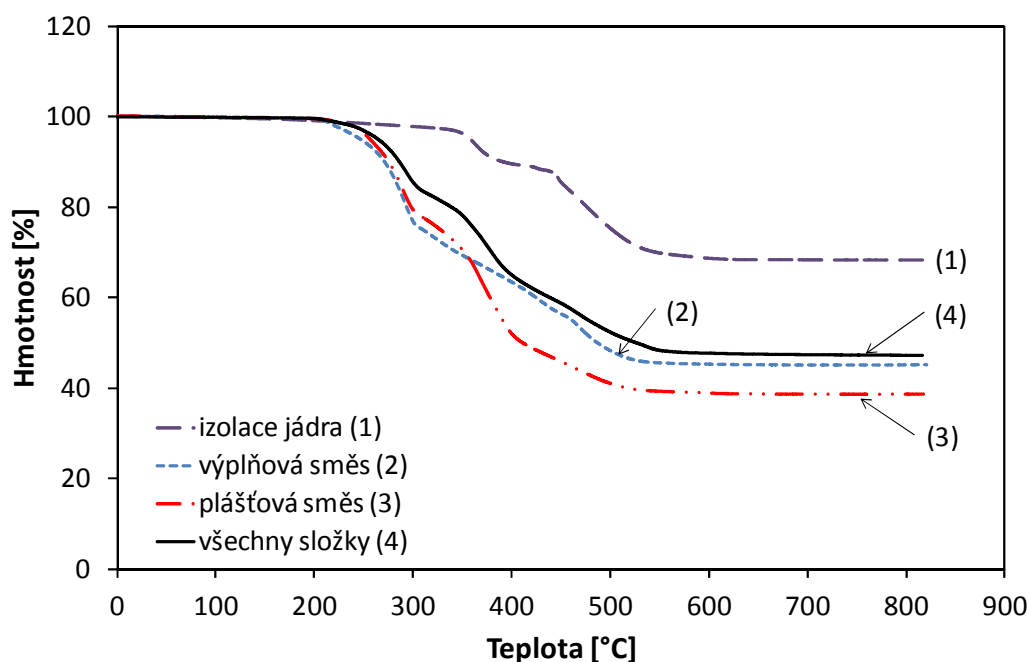
I v případě kabelu se silikonovým kaučukem byla termogravimetrická analýza provedena jak pro jednotlivé jeho části zvlášť, tak pro všechny součásti izolace umístěné v jednom kelímku. Jejich konkrétní hmotnostní poměry k celkové hmotnosti kabelové izolace jsou uvedeny v tab. 4.

## Analýza dějů provázejících tepelný rozklad kabelové izolace

Tab. 4: Hmotnostní poměry jednotlivých složek k celkové hmotnosti kabelové izolace

Vrstva č.	Popis izolace	Hmotnostní poměr [hm%]
1	Silikonový kaučuk (PDMS)	24,10
2	Výplň (LDPE/EVA s ATH)	26,84
3	Plášť (LDPE/EVA s ATH)	49,06

Předchozí typ kabelu obsahoval požární bariéru ve formě skloslídové pásky navinuté na jádře kabelu a ohniodolné FR pásky navinuté na jeho výplni. Zatímco oba zkoušené kabely používají stejný materiál pro plášť i výplň (složený z HFFR směsi založené na LDPE/EVA vysoce plněné retardérem hoření – hydroxidem hlinitým), podstatu požární bariéry mají oba kabely zcela odlišnou. Proto lze očekávat, že způsob, jakým tento typ kabelu dosahuje funkčnosti v podmínkách požáru, bude také odlišný. Výsledky TGA pro druhou testovanou kabelovou konstrukci shrnuje obr. 26.



Obr. 26: TGA křivky všech materiálů vyskytujících se v kabelové konstrukci

V tomto případě se očekává, že je funkčnost kabelu v podmínkách požáru plnohodnotně zajištěna pouze použitím keramizujícího silikonu na bázi polydimetylsiloxanu pro izolaci jader (křivka č. 1 na obr. 26). Podle Hamdaniho a kol. [69] vytváří silikony vystavené rostoucí teplotě v oxidačním prostředí anorganický zbytek z oxidu křemičitého, který slouží jako „izolační pokrývka“ působící jako zábrana zpomalující transport odpařujících se rozkladných produktů. Proto se snižuje množství těkavých látek v plynné fázi, které by

Analýza dějů provázejících tepelný rozklad kabelové izolace

---

mohly hořet, a zároveň i množství tepla vracejícího se zpět k povrchu polymeru. Zbývající vrstva z oxidu křemičitého zároveň slouží jako tepelná izolace chránící povrch polymeru před tepelným tokem přicházejícím zvenčí (od plamene). Mnoho autorů [70]–[72] popisuje rozklad PDMS (nebo jeho směsí) zejména v dusíkové atmosféře. Autoři konstatují, že rozklad čistého PDMS v podmínkách inertní atmosféry dusíku probíhá v jednom hladkém kroku.

Hamdani a kol. [69] ve své studii s odkazem na práce Camina a kol. [73], [74] uvádí, že produkty tepelné degradace PDMS se liší v závislosti na teplotě a povaze plynného prostředí, ve kterém mohou souběžně probíhat dva různé mechanismy tepelné degradace. Camino a kol. [74] vyvozuje závěr, že při nízké rychlosti ohřevu (okolo 1 °C/min) je termooxidační degradace PDMS značně odlišná od degradace v podmínkách inertní atmosféry dusíku. V přítomnosti dusíku se objevuje jednokroková tepelná degradace začínající při teplotě 514 °C, při které vzniká směs oligomerů. Naopak, v přítomnosti vzduchu jsou pozorovány minimálně dvě fáze degradace. První, začínající při teplotě 339 °C a druhá při 400 °C. Hlavní produkty tepelné degradace jsou v obou krocích podobné produktům vznikajícím v atmosféře dusíku, tedy směsi různých oligomerů, ovšem v oxidující atmosféře se přidává navíc oxid uhličitý a voda. V případě oxidující atmosféry se rovněž objeví při 500 °C jemný bílý prášek čistého oxidu křemičitého (siliky), v konečném množství cca 60 hm%. Při vyšších rychlostech ohřevu (kolem 50 °C/min) se úbytky hmotnosti posunují do vyšších teplot v obou atmosférách a konečný zbytek siliky se pohybuje okolo 10 hm%. Při rychlostech ohřevu kolem 100 °C/min má tepelná degradace PDMS tendenci se překrývat v obou typech atmosféry. Zatímco v dusíku vzniká malé množství (4 hm%) černého zbytku (silikon karbid nebo oxykarbid) při teplotách 700 – 800 °C, v případě termooxidační degradace je černý zbytek obtížně rozeznatelný ve velkém množství bílé siliky. Tepelný rozklad je omezován nízkou reakční rychlostí materiálu s kyslíkem, nízkou rozpustností kyslíku a vysokou rychlostí tepelné degradace. Přímá reakce kyslíku s kondenzovanou fází se buď nevyskytuje vůbec, nebo pouze v omezené míře (viz podrobněji [69] a [73], [74]).

Výsledky získané pomocí TGA (viz křivka 1 na obr. 26) pro keramizující silikonový kaučuk z druhé kabelové konstrukce jsou v dobré shodě s výsledky Camina a kol. [74] pro rychlost ohřevu 1 °C/min. Dvoukroková degradace objevující se při teplotách 380 °C a 470 °C je posunuta do vyšších teplot s největší pravděpodobností kvůli použité vyšší rychlosti ohřevu (10 °C/min). Nicméně v reálných podmínkách požáru by měl být

## Analýza dějů provázejících tepelný rozklad kabelové izolace

---

očekávan průběh rozkladu podobný těm, které uvádí Camino a kol. [74] pro výrazně vyšší rychlosti ohřevu (50 °C/min a více).

Co se týká výplně kabelu, ta byla opět extrudována z termoplastické, nízkodýmivé, bezhalogenové, oheňretardující směsi na bázi polymeru LDPE/EVA vysoce plněným ATH. Vnější plášť kabelu byl vytlačen z obdobné směsi, pouze s nižším obsahem ATH. Výsledky z TGA pro obě směsi jsou taktéž zobrazeny na obr. 26 jako křivky (2) a (3). Z grafu je zřejmé, že se plášťová směs rozkládá ve třech hlavních krocích v intervalech 220 – 335 °C, 337 – 450 °C a 450 – 560 °C. Zatímco první krok odpovídá tepelnému rozkladu ATH, další dva kroky souvisejí s termooxidační degradací LDPE/EVA. Podrobnější popis tohoto rozkladu byl již uveden u předchozího typu kabelu. Při porovnání TGA křivek plášťové a výplňové směsi je vidět rozdíl v průběhu rozkladu způsobený vyšším obsahem ATH u výplňové směsi. Ten ovlivňuje rozklad výplňové směsi zejména v rozsahu teplot 330 – 473 °C, kde nastává zřetelnější překrývání rozkladu ATH s degradací PE, než v případě plášťové směsi. Vyšší obsah ATH vytváří taktéž větší množství nespalitelného anorganického zbytku (45,11 hm% oproti plášťové směsi, kde tvoří 38,6 hm%).

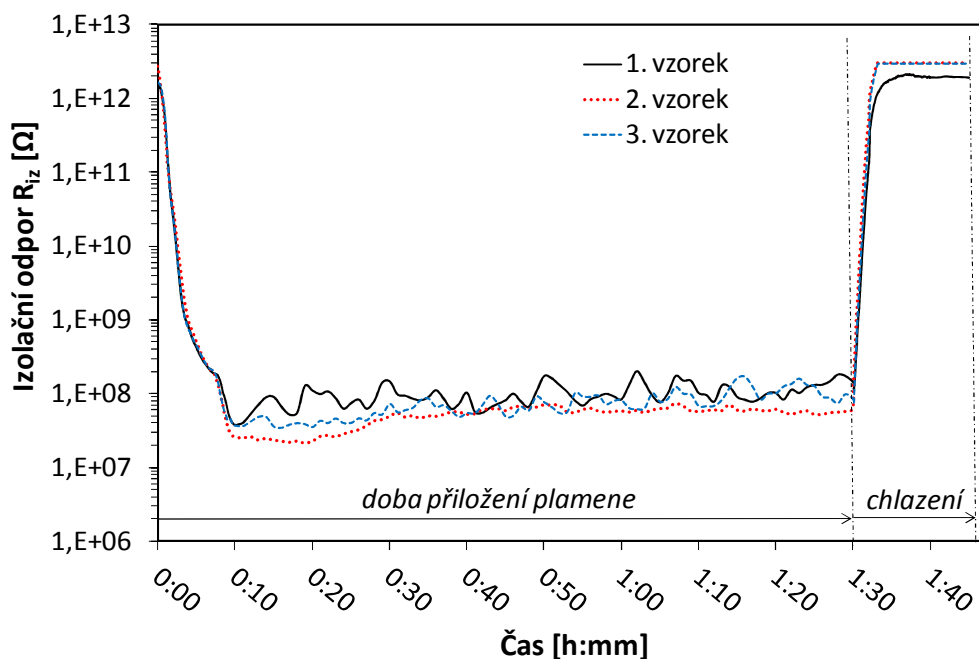
Poslední křivka (4) na obr. 26 představuje znovu celkový rozklad všech materiálů použitých k izolaci kabelu umístěných v jednom kelímku. Zaznamenaný tříkrokový rozklad probíhá v rozmezí teplot 210 – 340 °C, 340 – 470 °C a 470 – 610 °C. Je očividné, že je řízen rozkladem směsi LDPE/EVA s retardérem hoření ATH, jejíž celkové zastoupení v kompletní kabelové izolaci je 75,9 hm%. Taktéž je z grafu zřejmé, že rozklad silikonového kaučuku napomáhá k posunutí všech zaznamenaných jevů směrem k vyšším teplotám.

## ***7.2 Vývoj izolačního odporu kabelové izolace v podmínkách požáru***

Tato kapitola popíše získané výsledky a objasní z nich plynoucí fakta s ohledem na vývoj elektrických vlastností obou testovaných konstrukcí kabelů během požárního zatížení.

### **7.2.1 Kabel se skloslídovou páskou**

Jak již bylo řečeno, všechny dále popisované experimenty byly prováděny s četností měření tři. Vývoj izolačního odporu kabelu se skloslídovou páskou během modifikovaného požárního testu u všech tří zkoušených vzorků je zobrazen na obr. 27.



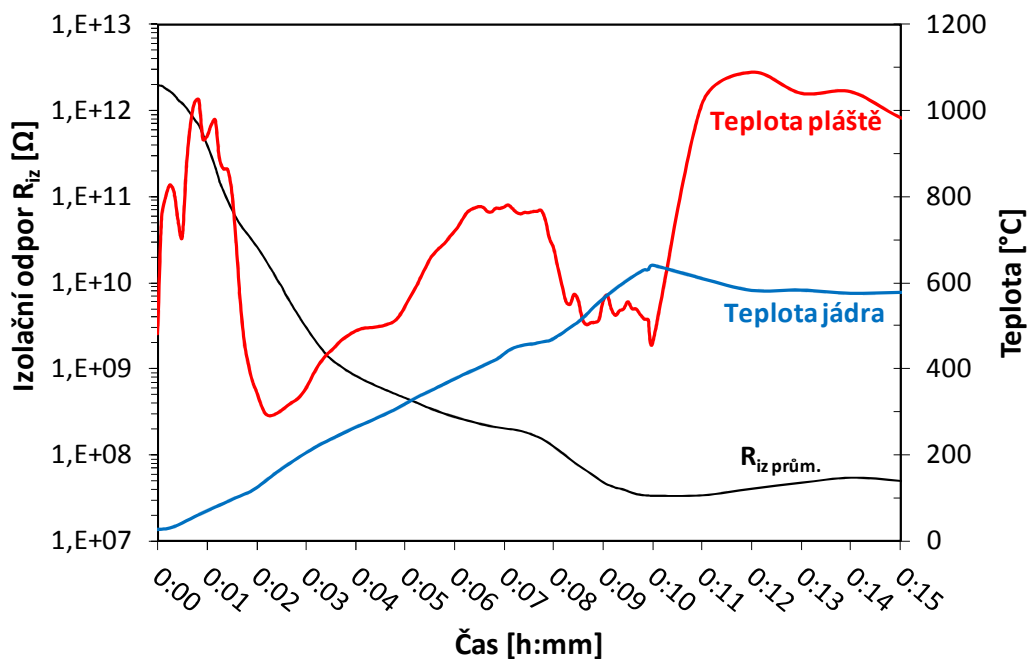
Obr. 27: Časová závislost izolačního odporu tří testovaných vzorků

Jak je z obrázku vidět, opakovatelnost měření je, i s ohledem na nestabilní měřicí podmínky, překvapivě velice dobrá. A to zejména během prvních deseti minut zkoušky a taktéž v době chlazení, tedy po vypnutí hořáku. Časová oblast začínající v desáté minutě a končící v minutě devadesáté je charakteristická lehkou variabilitou dat, která je pozorovatelná u všech tří testovaných vzorků. Variabilita je způsobena kolísáním intenzity plamene, kterému se nelze zcela vyhnout. Tento negativní jev patří k neodmyslitelné součásti podobných požárních zkoušek.

Na obr. 28 je znázorněna křivka průměrných hodnot izolačního odporu ( $R_{iz}$  prům.) společně se dvěma křivkami zobrazujícími vývoj teploty pláště (v grafu označeno jako „teplota pláště“) a středu kabelu (v grafu označeno jako „teplota jádra“) po dobu prvních 15 minut zkoušky. Z grafu je možné pozorovat nejprve výrazný pokles izolačního odporu o více než čtyři řády v několika krocích jako reakce na přiložení plamene.

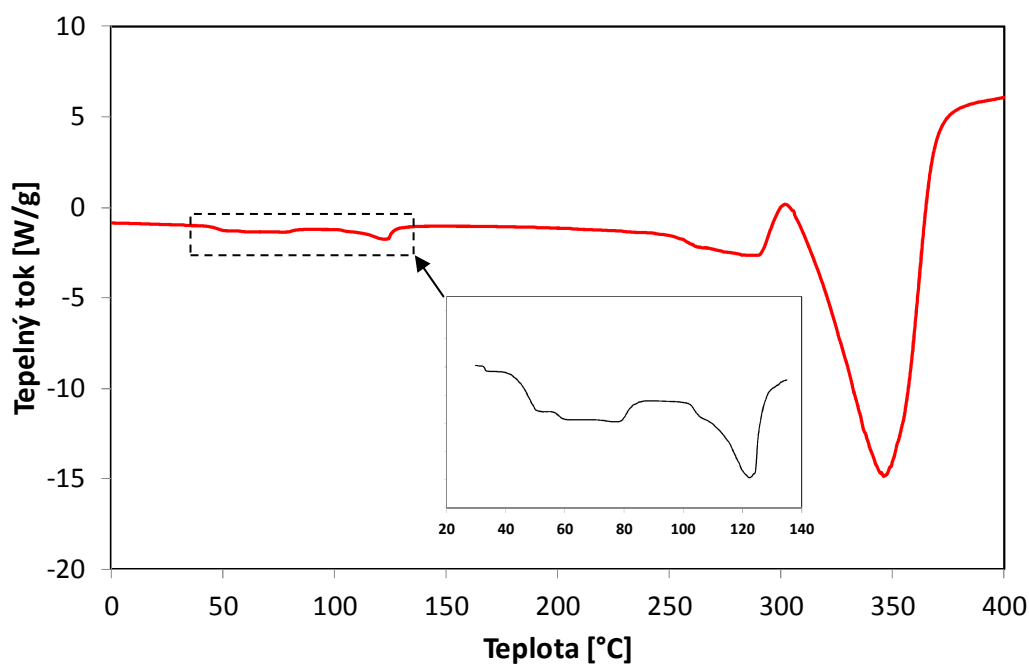
Signály z obou termočlánků se ukazují jako velice nápomocné při interpretaci chování izolačního odporu. Nejzajímavější děje probíhají v prvních šesti minutách. V okamžiku, kdy se plamen dostane poprvé do přímého kontaktu s pláštěm kabelu, teplota na přiloženém plášťovém termočlánku téměř okamžitě vyskočí na 800 °C a má tendenci dále růst.

## Analýza dějů provázejících tepelný rozklad kabelové izolace



Obr. 28: Průměrný izolační odpor společně s měřením teploty z obou termočlánků (prvních 15 minut testu)

Jakmile začne plášť kabelu tát, lze na signálu z tohoto termočlánku zaznamenat celkem tři poklesy (lokální minima), která by, dle prvotní hypotézy, mohla souviset právě s procesem tání pláště. Pro objasnění této hypotézy byla provedena DSC analýza plášťového materiálu za podmínek velice rychlého ohřevu materiálu ( $60^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ), její výsledek zobrazuje obr. 29.



Obr. 29: DSC analýza plášťové směsi při velké rychlosti ohřevu ( $60^{\circ}\text{C}/\text{min}$ )

Analýza dějů provázejících tepelný rozklad kabelové izolace

---

Mnoho studií zabývajících se morfologií, reologií a táním EVA a jeho směsí s LDPE (nebo HDPE) [75]–[80] potvrzuje, že pro dvoufázovou strukturu polymeru LDPE/EVA je charakteristická komplexní oblast tání obsahující dvě fáze - samostatné tání fáze EVA (obvykle mezi 40 a 85 °C) a fáze LDPE (mezi 100 a 120 °C). Tání fáze EVA je obvykle zobrazeno jako dva překrývající se endotermické píky. Tento jev je důkazem obsahu dvou různých krystalických struktur. Jak uvádí Agroui a kol. [80], pík objevující se při nižších teplotách odpovídá tání nedokonalých, malých krystalitů, které reprezentují včlenění vinylacetátu do struktury polyetyleny. Druhý pík pak odpovídá tání větších a pravidelněji uspořádaných krystalitů v polyetyleny. V grafu na obr. 29 jsou tato minima hůře znatelná, protože jsou deformována velmi rychlým ohřevem materiálu.

Nicméně termočlánek dotýkající se pláště kabelu zaznamenal tyto jevy ve třech (endotermických) poklesech, které jsou superponovány na celkovou teplotní křivku. Pokud se vrátíme k vývoji izolačního odporu, vidíme, že tání LDPE/EVA má za následek jeho pokles o jeden řád. Je dobře známo, že elektrická vodivost (společně s tepelnou vodivostí [81]) polymerů roste s rostoucí teplotou, a to až do dosažení maxima, které odpovídá právě teplotě tání krystalitů (např. [82]).

Vzhledem k rychlé změně (nárůstu) teploty po přiložení plamene na vzorek kabelu, začíná okamžitě pracovat také ATH obsažený v plášťové směsi. Rozkládá se za vzniku molekul vody v masivní endotermické reakci společně s táním LDPE/EVA. To se projevuje jako náhlý pokles v teplotě pláště mezi první a druhou minutou testu. Rozklad ATH byl taktéž zaznamenán na DSC (viz obr. 29) v rozsahu teplot 250 až 390 °C. Uvolnění významného množství vody zpomaluje tepelný rozklad kabelového pláště. Na druhou stranu, přítomnost molekul vody má vliv na pokles izolačního odporu o další dva řády, což je vidět mezi druhou a třetí minutou na obr. 28. Zatímco se voda vypařuje, vliv plamene začíná znovu převládat a teplota pláště v časovém intervalu mezi druhou a šestou minutou opět postupně roste. Ve stejné chvíli se tvoří ochranná, elektricky a tepelně izolační vrstva z neshořených zbytků směsi LDPE/EVA a ATH. Aktuální stav celého kabelu ve třetí minutě zkoušky je vidět na obr. 30.





Obr. 30: Fotografie vzorku kabelu podrobeného zkoušce v čase 0:03:00.

Je patrné, že vnější ochranná vrstva není konzistentní a vysoce intenzivní plamen ji může snadno poškodit a zničit. Přibližně v šesté minutě zbytky ochranné vrstvy bohužel přikryly (a zároveň ochránily termočlánek) u pláště. To způsobilo neočekávanou stabilizaci teploty pláště mezi šestou a osmou minutou zkoušky a později, přibližně mezi osmou a desátou minutou, i její pokles.

Stejně tak, jako teplota pláště, i vývoj teploty uvnitř kabelu je velice zajímavý. Jak lze odvodit z průběhu na obr. 28, teplota uvnitř kabelu nejprve (téměř) lineárně narůstá přibližnou rychlostí  $60\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$  dokud nedosáhne hodnoty  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ , v tomto okamžiku se izolace žil z XLPE náhle vznítí. Jak již bylo řečeno, teplota  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$  odpovídá teplotě vznícení mnoha karboxylových kyselin, které dominují pozdějším fázím degradace XLPE [67]. Vznícení XLPE má vážný dopad na celou požární zkoušku, protože může přispět k: 1) destrukci zbytkové ochranné vrstvy vytvořené dříve z materiálu kabelového pláště a výplně, 2) dočasnému nárůstu vnitřní teploty uvnitř duše kabelu, 3) dalšímu poklesu izolačního odporu vzhledem k vodivosti karboxylových kyselin [83] i samotného plamene [47] uvnitř duše (v prostoru pod ohniodolnou FR páskou), který vzniká při vznícení XLPE. Dočasné zvýšení vnitřní teploty společně s poklesem izolačního odporu je viditelné na obr. 28 mezi 8. a 14. minutou. Když vnitřní teplota dosáhne v desáté minutě svého maxima, plynné produkty generované rozkladem XLPE již mají takovou sílu, že projdou směrem k povrchu kabelu přes zuhelnatělé zbytky po výplni, přes ohniodolnou FR pásku a mohou rozrušit zuhelnatělé zbytky po plášti, které do až do této chvíle na povrchu kabelu zůstávaly. Právě v tomto okamžiku odpadla, společně s ostatními zbytky na povrchu kabelu, i vrstva zuhelnatělého popela, která v šesté minutě přikryla termočlánek umístěný u pláště kabelu. Důsledkem toho se teplota zaznamenávaná plášťovým termočlánekem

Analýza dějů provázejících tepelný rozklad kabelové izolace

---

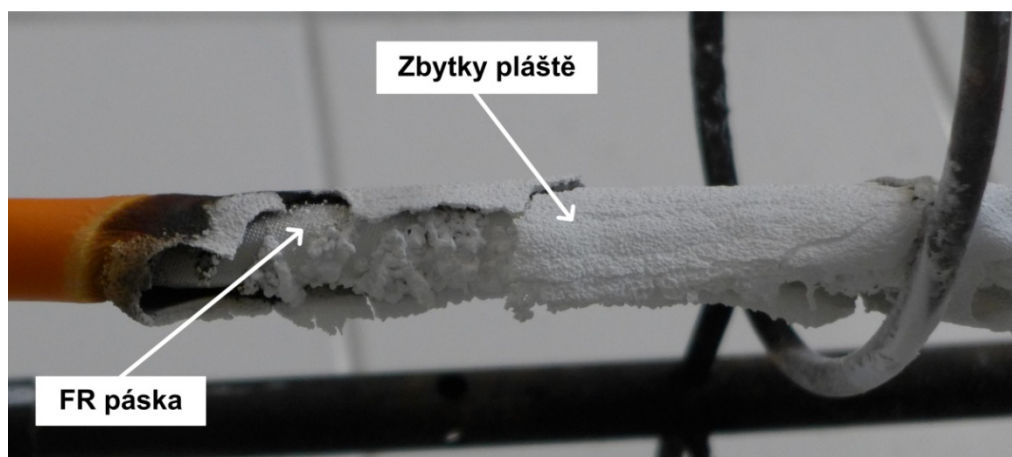
nečekaně zvýšila a ustálila v teplotním rozmezí 1000 – 1100 °C. Je nasnadě také poznamenat, že se hodnota izolačního odporu, počínaje desátou minutou zkoušky, opět mírně zvýšila ze svého lokálního minima. To lze přisoudit odchodu posledních zbytků karboxylových kyselin i odeznění procesu hoření XLPE v prostoru duše kabelu. Oba tyto jevy až doposud zvyšovaly elektrickou vodivost mezi jednotlivými žilami kabelu.

I přes skutečnost, že vnější ochranná vrstva postupně opadává z kabelu během celého testu, ohniodolná FR páska společně se zbytky výplně dlouhodobě udržují uvnitř kabelu sníženou teplotu přibližně z 1000 °C na 600 °C (trvalý rozdíl mezi teplotou pláště a teplotou jádra). Ohniodolná FR páska mimo jiné chrání vodivá měděná jádra před jejich roztavením [57].

Vodivá jádra kabelu jsou, po zničení všech organických částí izolace, chráněna také skloslídovou páskou a již zmíněným anorganickým zbytkem po výplni po celou zbývající dobu zkoušky. Všechny tyto izolační materiály přispívají ke stabilní hodnotě izolačního odporu během druhého segmentu zkoušky (od desáté do devadesáté minuty – viz obr. 27), jehož hodnota je rovna  $7,5 \cdot 10^7 \Omega$  (průměrná hodnota izolačního odporu mezi 10. a 90. minutou zkoušky stanovená na základě všech testovaných vzorků). Vzhledem k tomu, že skloslídová páska i ohniodolná FR páska patří do skupiny velmi dobrých izolantů s rezistivitou obvykle větší než  $10^{12} \Omega \cdot m$  (za běžných provozních teplot) [2], průměrná hodnota izolačního odporu mezi žilami kabelů se zdá být relativně nízká. Je zřejmé, že se zde nutně projevuje vodivost samotného plamene. Navzdory těmto nepříznivým podmínkám musí kabel zajistit funkčnost obvodu ještě minimálně po dobu dalších 80 minut požární zkoušky.

Rozhodující vliv vodivosti plamene na hodnotu izolačního odporu v průběhu druhého časového segmentu byl prokazatelně potvrzen ihned po vypnutí hořáku. Jak je zřejmé z obr. 27, během chlazení je izolační stav kabelu obnoven nebo se alespoň blíží jeho původním hodnotám před zkouškou. Zřejmá saturace signálu izolačního odporu na obr. 27 při měření druhého a třetího vzorku, je způsobena dosažením maximální měřitelné hodnoty odporu pomocí měřicího přístroje MEGGER S1-552 ( $3 \cdot 10^{12} \Omega$ ).

Stav kabelové izolace po testu je zobrazen na obr. 31. Z fotografie je zřejmé, že zejména ohniodolná FR páska zaručuje celistvost celého kabelu. Právě z tohoto důvodu hraje u těchto typů kabelů velmi důležitou a téměř nezastupitelnou roli.

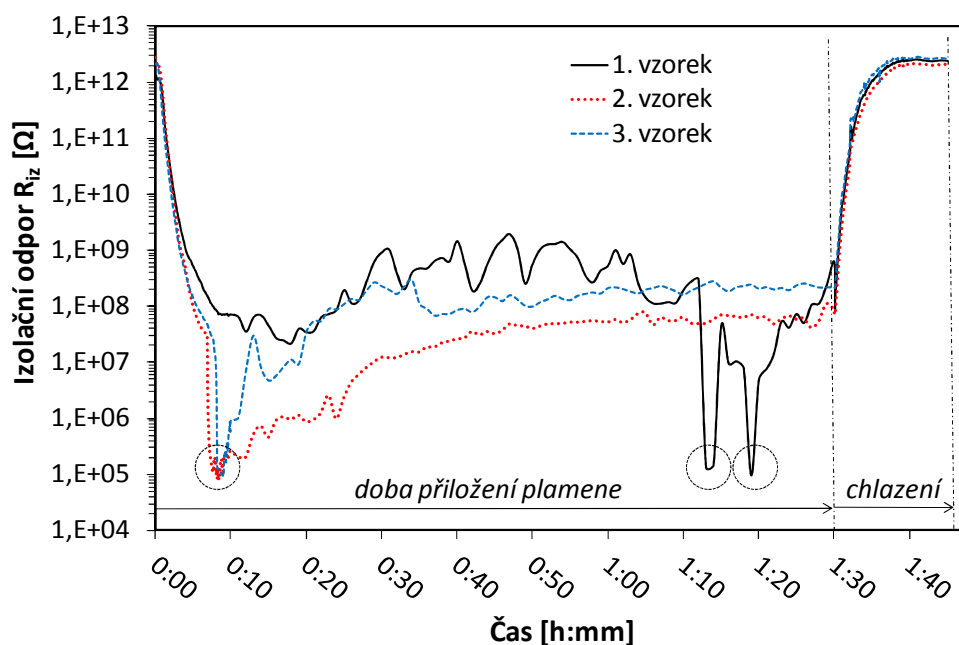


Obr. 31: Stav ohniodolné FR pásky a kabelového pláště po skončení testu

### 7.2.2 Modifikace kabelu se skloslídovou páskou

V dalších fázích experimentu byla konstrukce kabelu se skloslídovou páskou záměrně upravena. Cílem bylo poukázat na vypovídací schopnost a citlivost navržené modifikace požární zkoušky. V Kabelovně Kabex, a.s. byly dle předem daných požadavků připraveny vzorky, které obsahovaly: A) pouze jednu vrstvu skloslídové pásky okolo každého jádra kabelu (namísto dvou vrstev v dříve uvedeném případě) a B) pouze jednu vrstvu skloslídové pásky okolo každého jádra kabelu, ale současně dvě vrstvy ohniodolné FR pásky umístěné na výplni kabelu (oproti jedné vrstvě v původním experimentu).

Časovou závislost izolačního odporu kabelu s jednou vrstvou skloslídové pásky na jádře (varianta A) ukazuje obr. 32.

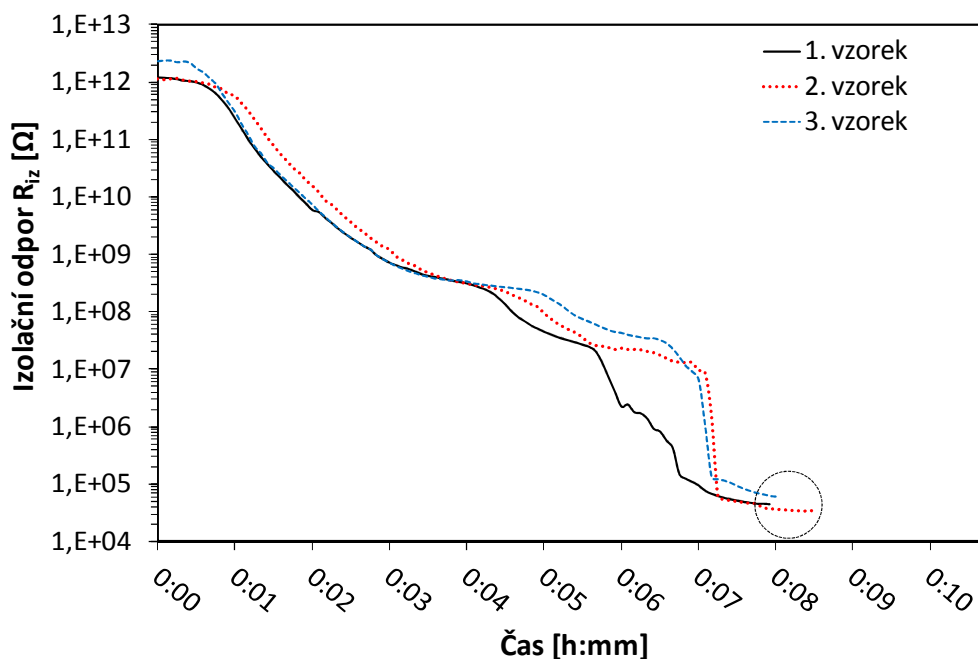


Obr. 32: Časová závislost izolačního odporu tří vzorků s jednou vrstvou skloslídové pásky

## Analýza dějů provázejících tepelný rozklad kabelové izolace

Při porovnání těchto výsledků s výsledky výše uvedeného experimentu (kabel se dvěma vrstvami skloslídové pásky, viz obr. 27) je možno si povšimnout toho, že křivka izolačního odporu je viditelně poznamenána touto zdánlivě drobnou změnou v konstrukci. Hodnoty izolačního odporu u 2. a 3. vzorku prudce klesají o více než sedm řádů a dochází, v jejich případě, téměř ke zkratu mezi 8. a 13. minutou zkoušky, v okamžiku vzplanutí XLPE izolace žil (tento předporuchový stav je označen na obr. 32 čárkovanými kružnicemi). První testovaný vzorek tento rozhodující okamžik vydržel, dokonce zpočátku zkoušky vykazoval podobné hodnoty izolačního odporu jako vzorky na obr. 27. Nicméně, jak je z obr. 32 zřejmé, před 90. minutou testu i tento vzorek opakovaně dosáhl téměř zkratového stavu. Z grafu je taktéž vidět, že rozkolísanost zaznamenávaných hodnot v druhém segmentu zkoušky (10. až 90. minuta zkoušky) je značně vyšší v porovnání s předchozím případem na obr. 27.

Druhou modifikací je kabel s jednou vrstvou skloslídové pásky kolem jádra, ale se dvěma vrstvami ohniodolné FR pásky na výplni (varianta B). Časová závislost izolačního odporu této kabelové konstrukce je vidět na obr. 33.



Obr. 33: Časová závislost izolačního odporu tří vzorků kabelu s jednou vrstvou skloslídové pásky na jádře a dvěma vrstvami ohniodolné FR pásky na kabelové výplni

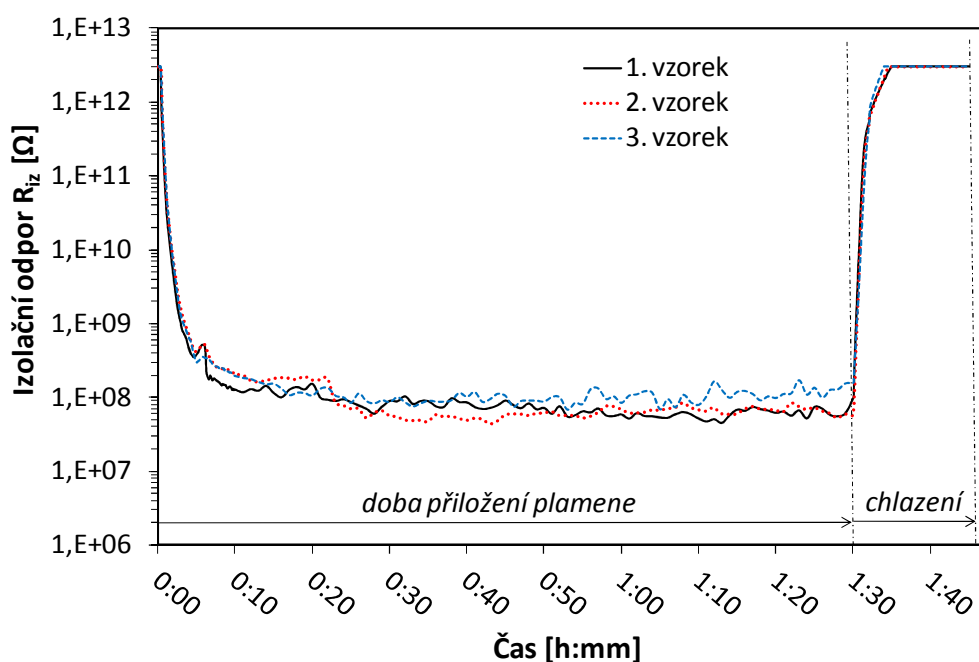
Tímto způsobem upravený kabel selhal ve všech třech měřených pokusech. Jak je zřejmé, hodnoty izolačního odporu opět prudce poklesly o více než sedm řádů během prvních osmi minut zkoušky. Ovšem, na rozdíl od předchozí modifikace, nyní ve všech

### Analýza dějů provázejících tepelný rozklad kabelové izolace

třech případech skutečně ke zkratu došlo (když dosáhne zkratový proud hodnotu 5 mA). Přístroj pro měření izolačního odporu byl díky své vnitřní ochraně odpojen z měřicího obvodu ve chvíli, kdy u všech tří testovaných vzorků docházelo ke vznícení XLPE. Pro vysvětlení této poruchy se nabízí následující vysvětlení: bylo již řečeno, že plynné produkty z rozkladu XLPE jsou nuceny procházet směrem k povrchu kabelu skrz ohniodolnou FR pásku. V tomto případě to díky dvěma vrstvám ohniodolné FR pásky pravděpodobně nebylo možné. Uvnitř duše kabelu se tedy v důsledku zvětšoval tlak, který následně působil na izolaci jader, v tomto případě sestávající pouze z jedné vrstvy skloslídové pásky. Tlak plyných produktů tímto způsobem zřejmě přispěl k porušení křehké izolační vrstvy ze skloslídové pásky a způsobil tak zkrat vodičů.

#### 7.2.3 Kabel izolovaný silikonovým kaučukem

Chování izolačního odporu kabelu izolovaného silikonovým kaučukem během celého experimentu pro všechny tři vzorky je znázorněno na obr. 34.

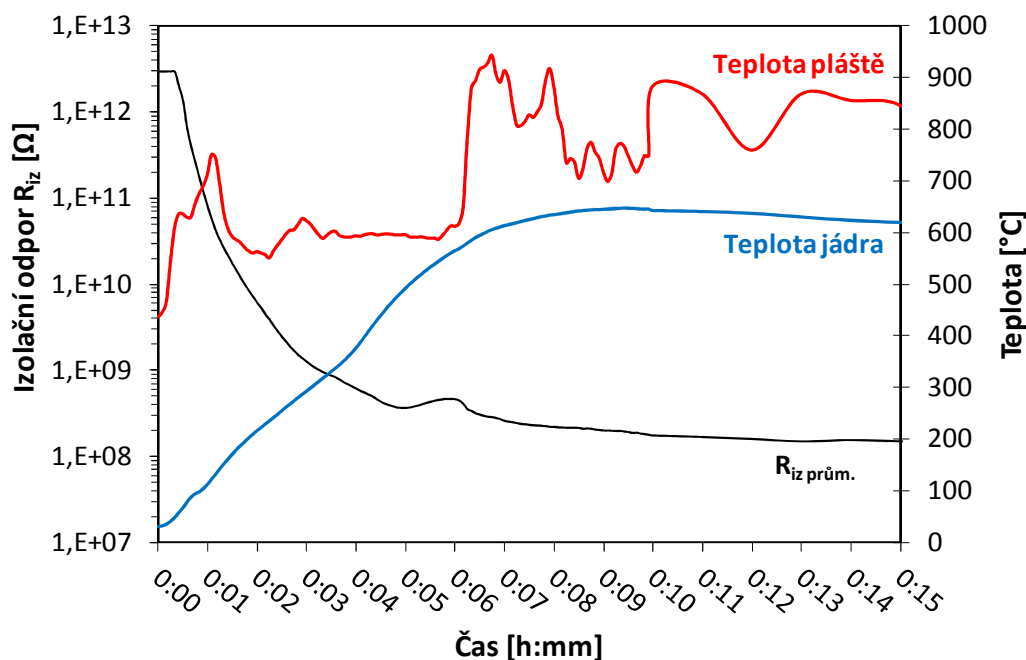


Obr. 34: Časová závislost izolačního odporu kabelu všech tří testovaných vzorků silikonového kabelu

Jak je z grafu vidět, opakovatelnost měření je zejména pro prvních deset minut a pro segment chlazení opět velice dobrá. Časový úsek začínající v desáté minutě a končící v minutě devadesáté je znovu charakteristický mírnou variabilitou měřených dat, což platí pro všechny tři testované vzorky. Na obr. 35 je vynesena průběh průměrné hodnoty

### Analýza dějů provázejících tepelný rozklad kabelové izolace

izolačního odporu kabelu a vývoj teplot pláště a jádra získaný z obou termočlánků pro prvních patnáct minut testu.



Obr. 35: Průměrný izolační odpor kabelu a měření teploty z obou termočlánků (prvních 15 minut testu)

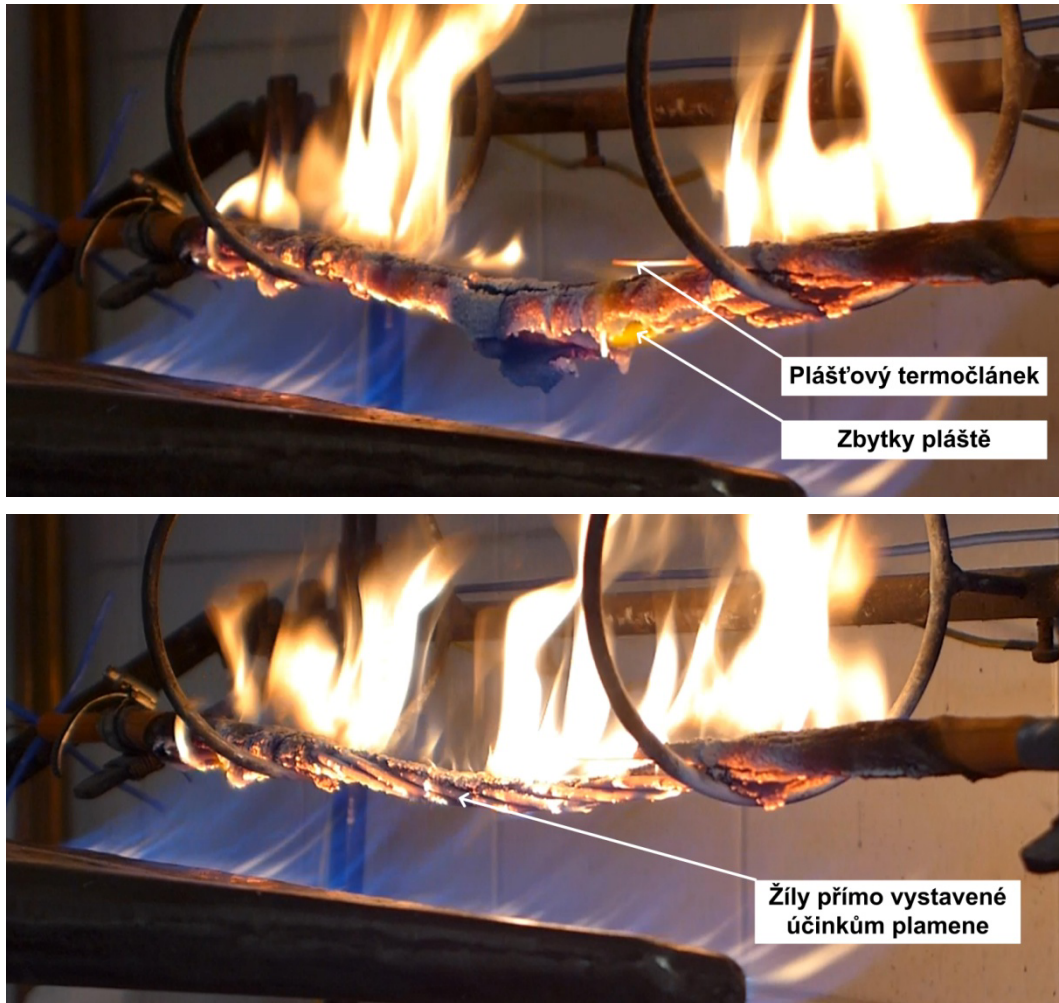
Jak je z obr. 35 zřejmé, okamžitou reakcí kabelu na přiložení plamene je pokles jeho izolačního odporu o čtyři řády během prvních pěti minut a to hned v několika krocích. Obrázek dále ilustruje téměř lineární nárůst teploty jádra kabelu přibližnou rychlostí 100 °C/min do teploty 500 °C, při které se nárůst teploty zpomaluje. Ta následně dosahuje svého maxima (650 °C) mezi devátou a desátou minutou testu. Chování izolačního odporu kabelové izolace společně s vývojem teplot z obou termočlánků během těchto prvních pěti minut je řízeno táním plášťového materiálu a výplňové směsi, což bylo detailně rozebráno v předchozí kapitole. Opět se začíná endotermně rozkládat ATH za vzniku molekul vody, které zpomalují hoření, ale také výrazně snižují izolační odpor kabelu. Mezi druhou a třetí minutou je opět vidět mírné zvýšení teploty způsobené působícím plamenem po odpaření veškeré vody. V tomto okamžiku se, tak jako v předchozím případě, znovu vytvoří na povrchu kabelu ochranná vrstva ze zbytků shořelého pláště i výplně. Stav kabelu v tomto okamžiku zachycuje fotografie na obr. 36. Je zřejmé, že v této chvíli je převážná část povrchu kabelu stále pokryta a chráněna. Anorganické zbytky ve třetí minutě testu opět nabobtnaly a zakryly vnější termočlánek, který byl umístěn podél kabelového pláště. Důsledkem toho došlo mezi třetí a šestou minutou testu k ustálení vnější teploty (viz obr. 35).





Obr. 36: Fotografie stavu testovaného kabelu v čase 0:03:00

Nejzajímavější jev se objevuje mezi pátou a šestou minutou zkoušky na křivce izolačního odporu. V tomto rozmezí dochází nejprve ke znatelnému nárůstu izolačního odporu, který ovšem následně, v šesté minutě testu, opět klesá. Tento nárůst je pravděpodobně způsoben tvorbou ochranné vrstvy z oxidu křemičitého během termooxidační degradace izolace žil, které jsou vyrobeny z PDMS. Navýšení izolačního odporu začíná při dosažení teploty 500 °C na vnitřním termočlánku, což dobře koreluje s výsledky z TGA (viz křivka č. 1 na obr. 26) a výsledky publikovanými jinými autory [69], [71], [73], [74]. Oxid křemičitý neboli silika je obecně vnímán jako velice dobrý izolant a za normálních podmínek je jeho vnitřní rezistivita o 3 až 6 řádů vyšší v porovnání s PDMS. Shin a Tomozawa [84] měřili teplotní závislost rezistivity tří oxidokřemičitých skel, jejich hodnoty rezistivity se při 500 °C pohybují v rozmezí hodnot  $3 \cdot 10^6$  -  $8 \cdot 10^8$   $\Omega \cdot \text{cm}$  a při 200 °C v rozmezí hodnot  $2 \cdot 10^{12}$  -  $4 \cdot 10^{16}$   $\Omega \cdot \text{cm}$ . Nárůst izolačního odporu byl zastaven v šesté minutě, kdy došlo k odpadnutí většiny anorganických zbytků pláště až do této chvíle zůstávajících na povrchu kabelu. Kabelové žíly společně s plášťovým termočlánkem byly od této chvíle náhle vystaveny přímému působení plamene (viz skokový nárůst teploty zaznamenané plášťovým termočlánkem na obr. 35 v šesté minutě). Teplota pláště náhle vzrostla na 940 °C a následně oscillovala mezi 700 až 900 °C v závislosti na tom, jak postupně odhořívaly poslední zbytky pláště v blízkosti termočlánku (viz obr. 37). Počátkem šesté minuty izolační odpor poklesl a postupně se ustálil na hodnotě  $8,9 \cdot 10^7$   $\Omega$  (průměrná hodnota izolačního odporu mezi 10. a 90. minutou pro všechny tři měřené vzorky), která je silně ovlivněna vodivostí plamene [50]. Ten prosycuje strukturu siliky po celý zbytek testu. Stav kabelové izolace po testu je vidět na obr. 38.



Obr. 37: Fotografie stavu kabelu v čase 0:08:40 (nahore) a v čase 0:09:00 (dole)



Obr. 38: Fotografie stavu testovaného kabelu po skončení testu

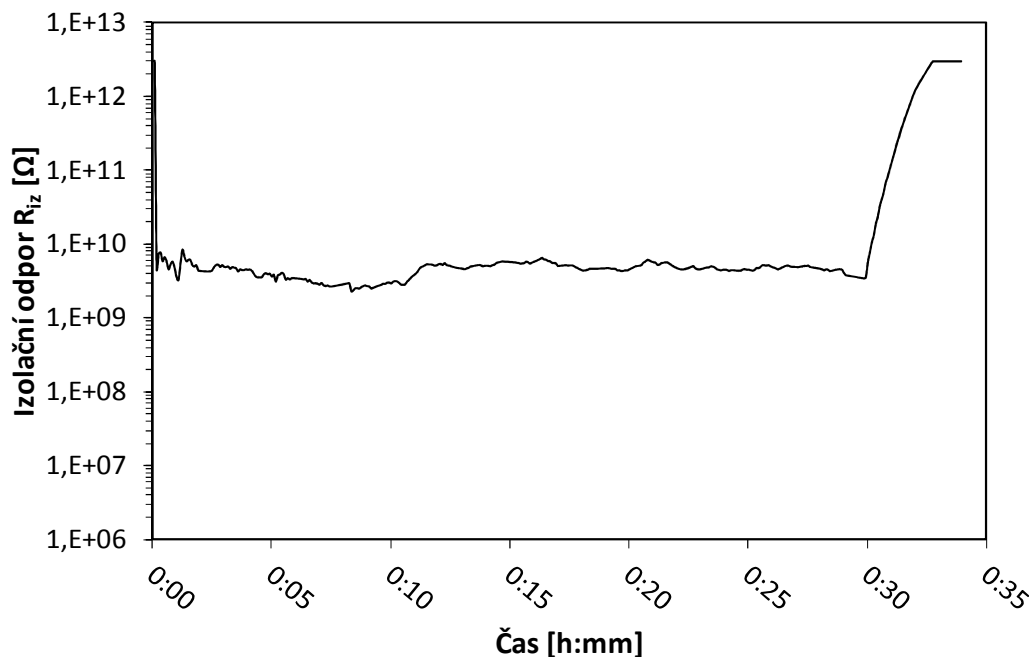


#### 7.2.4 Faktory ovlivňující měření izolačního odporu

Jak bylo zmíněno výše, již ze samé podstaty požárního testování kabelů je zřejmé, že hodnota izolačního odporu je velmi silně ovlivněna působením samotného plamene. Literatura uvádí, že plamen má tendenci chovat se jako vodič. Vliv elektrického pole na plamen je testován již po mnoho let [48], [49]. Popis mechanismů jeho vodivosti je obvykle nedílnou součástí těchto studií. Samotná hodnota vodivosti plamene pak může být použita např. pro stanovení koncentrace nebo pohyblivosti iontů v plameni [50]. Stejnoseměrné nebo střídavé elektrické pole působí na ionty přirozeně se vyskytující nebo v plameni teprve vytvořené. Klaus a kol. [47] měřil vodivost plamene zapálené směsi metanu a kyslíku s použitím elektrod vložených do plamene a zaznamenal hodnoty izolačního odporu mezi 2 až  $7,6 \cdot 10^7 \Omega$  pro 1500 V střídavého napětí v závislosti na koeficientu přístupu vzduchu. Jejich výsledky jsou v souladu se závěry této práce.

Pro ověření vodivosti plamene byla přesto provedena jednoduchá zkouška, v jejímž rámci byly do plamene vloženy dva holé měděné vodiče, připojené na napětí 1500 V. Jejich vzájemná vzdálenost byla na začátku testu nastavena na 2 mm. Jednalo se o vodiče zcela identické s těmi, které byly použity pro výrobu kabelů testovaných v rámci výše zmíněných požárních testů. Hodnoty izolačního odporu byly zaznamenávány v intervalu 5 vteřin. Naměřený záznam vývoje izolačního odporu v závislosti na čase je uveden na obr. 39. Je důležité zmínit, že vodiče byly v kontaktu s plamenem po dobu 30 minut, následně byl hořák vypnut. V tomto okamžiku došlo opět k výraznému nárůstu hodnoty izolačního odporu a to až do saturace signálu, která byla způsobena dosažením maximální měřitelné hodnoty odporu pomocí měřicího přístroje MEGGER S1-552 ( $3 \cdot 10^{12} \Omega$ ).

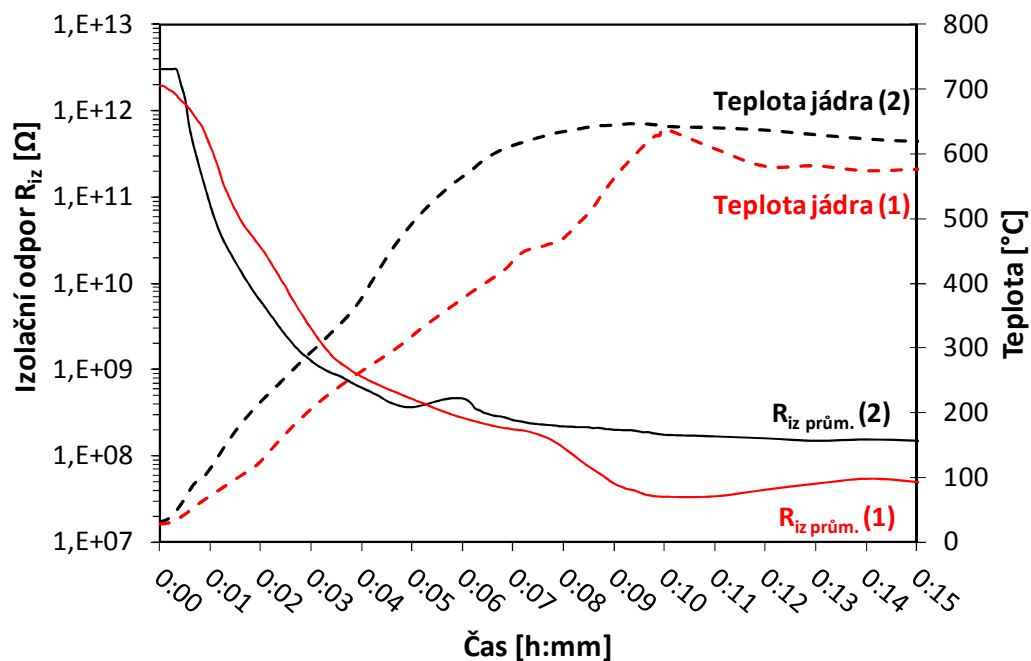
Průměrná hodnota izolačního odporu v měřeném intervalu 30 minut činila  $4,47 \cdot 10^9 \Omega$ . S ohledem na to, že vzájemná vzdálenost mezi vodiči byla při tomto testu (z praktických důvodů) výrazně větší než v případě vzájemně stočených kabelových žil, se dá konstatovat, že naměřená hodnota izolačního odporu odpovídá parametrům zjištěným v průběhu požárních zkoušek.



Obr. 39: Časová závislost izolačního odporu plamene z propanbutanového hořáku

### 7.2.5 Vzájemné srovnání obou testovaných konstrukcí kabelů

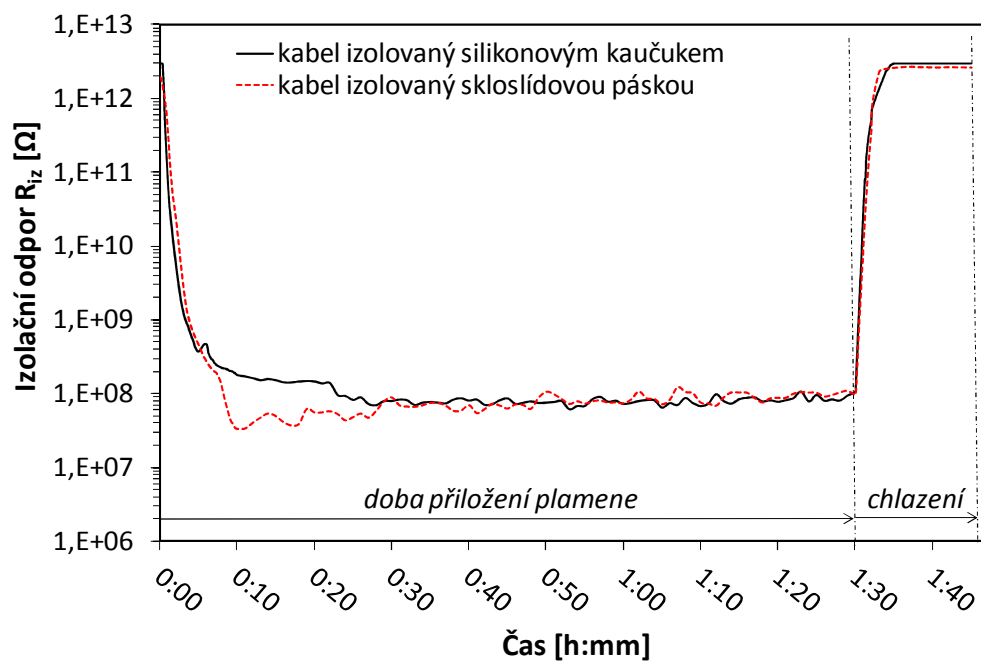
Velmi zajímavé je srovnání výsledků obou testovaných kabelů (ve standardním konstrukčním uspořádání) s rozdílnou požární bariérou, tedy kabelu se silikonovým kaučukem a kabelu se dvěma vrstvami skloslídové pásky (obr. 27 a 34). Až toto srovnání může poskytnout náhled na to, jak citlivá je navrhovaná metoda. Při pohledu na obr. 40 můžeme chování obou typů kabelů za podmínek požáru velmi dobře srovnat. V obrázku jsou vyneseny průběhy izolačního odporu a také průběhy vývoje vnitřní teploty. Je zřejmé, že zatímco v případě kabelu izolovaného skloslídovou páskou je pokles odporu v prvních fázích hoření pomalejší, u kabelu izolovaného silikonovým kaučukem dochází k poklesu mnohem rychleji. To je způsobeno tím, že první konstrukce kabelu obsahuje ohniodolnou FR pásku, která brání okamžitému rozkladu výplně. Dále je vidět, že zatímco u prvního kabelu byl v čase mezi 8. a 14. minutou zaznamenán výrazný pokles izolačního odporu, který je způsoben vznícením žilové izolace z XLPE, u druhého kabelu naopak dochází k nárůstu  $R_{iz}$  mezi 5. a 6. minutou. Jak již bylo řečeno, tento nárůst je způsoben formováním siliky. Jeho následný pokles je pak způsoben odpadnutím pláště a vystavením žilové izolace přímým účinkům plamene, který obsahuje volné nosiče náboje.



Obr. 40: Prvních 15 min zkoušky - průměrný izolační odpor obou typů kabelů a záznamy z měření teploty uvnitř kabelů: (1) kabel izolovaný dvěma vrstvami skloslídové pásky a jednou vrstvou ohniodolné FR pásky a (2) kabel izolovaný silikonovým kaučukem

Zajímavé je také srovnání vývoje vnitřních teplot. U kabelu izolovaného silikonovým kaučukem dochází k rychlejšímu nárůstu vnitřní teploty, který je dán absencí ohniodolné FR pásky. Nárůst této teploty je ovšem plynulejší. Nárůst vnitřní teploty v kabelu izolovaném skloslídovou páskou je o poznání pomalejší. Na tomto signálu je také vidět velmi výrazný nárůst a pokles vnitřní teploty v čase mezi 8. a 13. minutou, což odpovídá okamžiku vznícení a odhořívání žilové izolace. Hodnota ustálené vnitřní teploty po patnácti minutách testu je mírně vyšší v případě kabelu, který je izolovaný silikonovým kaučukem. Porovnání záznamů průměrných hodnot izolačního odporu během celé zkoušky pro oba dva typy ohniodolných kabelů je možné vidět na obr. 41.

## Analýza dějů provázejících tepelný rozklad kabelové izolace



Obr. 41: Porovnání časové závislosti izolačního odporu obou typů zkoušených kabelů

## 8 Shrnutí dosažených výsledků a přínosy práce

Mezi hlavní cíle této práce patří návrh a provedení vhodné modifikace zkoušky funkčnosti kabelů za podmínek požáru s předpokladem zvýšení její vypovídací schopnosti o konstrukci kabelu a schopnosti jednotlivých izolačních vrstev odolávat přímému působení plamene. Tento cíl byl, stejně jako další, jednoznačně splněn. Byl vytvořen nový měřicí postup, který spočívá v modifikaci požární zkoušky, a této zkoušce byly podrobeny dva konstrukčně odlišné typy kabelů, na nichž se prokázala dobrá opakovatelnost dosažených výsledků a zároveň zvýšená vypovídací schopnost takto provedené zkoušky. Bylo zjištěno, že izolační odpor je během testu velmi citlivě ovlivňován např. tavením organických částí izolace, rozkladem retardéru hoření, vzplanutím izolace jádra nebo formováním ochranné vrstvy ze siliky. Ustálená hodnota izolačního odporu v průběhu druhého segmentu testu (mezi 10. a 90. minutou zkoušky) a její následný nárůst během chlazení, kdy jsou její hodnoty buď téměř anebo skutečně navráceny do stavu před zkouškou, odkrývá velmi důležitou roli plamene během testování. Z výsledků testu lze posuzovat dostatečnost použité požární bariéry kabelu, zároveň lze ohodnotit její nejslabší místo a navrhnout optimální zlepšení.

V této práci byly porovnávány dva v praxi nejčastěji používané LFHC kabely, první s požární ochranou ve formě skloslídové pásky na jádře kabelu a druhý s izolací jader pomocí keramizujícího silikonu. Při srovnání jejich výsledků si lze všimnout, že kabel izolovaný silikonovým kaučukem vykazuje v ustálené oblasti (2. segment měření) vyšší hodnotu izolačního odporu. Spolu s porovnáním ceny obou typů kabelů i jejich konstrukční a výrobní náročností je možné říci, že je tento typ kabelu pro toto použití jednoznačně výhodnější.

Pro detailní interpretaci a pochopení jednotlivých dějů odehrávajících se během hoření izolačních vrstev kabelu bylo měření izolačního odporu doplněno provedením mnoha měření pomocí termických analýz, které velice dobře popisují děje odehrávající se během tepelného rozkladu jednotlivých použitých materiálů. TGA a DSC analýza je vhodným nástrojem k pochopení mechanismů, pomocí nichž se dosahuje funkčnosti kabelu při požáru. Během požární zkoušky byly použity také dva termočlánky, které zaznamenávaly teplotu v okolí pláště kabelu a teplotu uvnitř kabelu. Oba termočlánky se ukázaly být velice nápomocnými při vyhodnocování probíhajících dějů. V případě termočlánku umístěného v blízkosti pláště kabelu je ovšem velice těžké udržet jeho pozici během celé zkoušky na stejném místě, neboť se působením vysoké teploty pozice kabelu vždy trochu změní

Analýza dějů provázejících tepelný rozklad kabelové izolace

---

(nejčastěji dochází k jeho prověšení mezi podpěrnými kruhy). Pokud vnější termočlánek překryje bobtnající plášť, ukazuje se jeho použití velice výhodným, poněvadž může zaznamenávat i teplotní poměry při rozkladu retardéru hoření přímo v plášti. Na základě získaných zkušeností s výše uvedenou modifikací požární zkoušky, by při případných testech mělo být zváženo hlavně použití termočlátku uvnitř kabelu, neboť jím získané hodnoty jsou dobře opakovatelné a přímo spojené s ději probíhajícími v jádře kabelu.

Jelikož se jedná o měření velkého rozsahu odporu, je možné do budoucna uvažovat (pro pokrytí většího rozsahu a zvýšení citlivosti metody) také o zapojení více přístrojů pro měření izolačního odporu. V průběhu měření by mohly být jednotlivé přístroje připojovány a odpojovány tak, aby byl izolační odpor neustále měřen s co největší citlivostí.

## 9 Závěr

Při projektování stavebních objektů, ve kterých je kladen velký důraz na bezpečnost lidí nebo jsou vyžadovány vysoké nároky na ochranu zařízení, konstrukcí a materiálů je nezbytné využívat jen kabely určené pro speciální použití. Tyto kabely se vymykají standardním měřítkům díky jejich složité konstrukci i použitím špičkových materiálů pro jejich výrobu. Výjimečnosti těchto kabelů by měla odpovídat i úroveň diagnostických metod používaných pro charakterizaci jejich oheňretardujících vlastností. V úvodních kapitolách této práce bylo naznačeno, že ne ve všech případech dochází k maximálnímu využití potenciálu současných měřicích metod či měřicích postupů popsanych v normové základně týkající se této velmi důležité problematiky. Zamyslíme-li se nad možnými důsledky nedostatečného testování funkce kabelů pro speciální použití či podceněním jejich konstrukce, které by bylo orientováno na dosažení co nejnižší ceny, následky by mohly být v případě požáru fatální.

Předkládaná disertační práce je důkazem toho, že i po mnoho let používané a všeobecně uznávané měřicí postupy lze nadále vylepšovat a zvyšovat tak jejich vypovídací schopnost. Dosažené výsledky mohou pomoci jak při teoretickém návrhu nových měřicích metod a postupů, tak i v současné průmyslové praxi při vývoji nových konstrukcí kabelů pro speciální použití.

## Použitá literatura

- [1] Bebčák, P. *Požární bezpečnost staveb - Kabelové rozvody pro napájení požárně bezpečnostních zařízení a zařízení, která musejí zůstat v případě požáru funkční*. Ostrava : Fakulta bezpečnostního inženýrství, VŠB – TU Ostrava, 2009. 34 s.
- [2] COGEBI group. *Mica insulation tapes for fire-resistant electrical cables*. [www.cogebi.com/cables](http://www.cogebi.com/cables) [online]. 26. 8. 2011 [cit. 20. 2. 2015] Dostupné z: [http://www.presspahn.com/Products/Mica/COGEBI\\_FIROX\\_PYRONAX%20Brochure.pdf](http://www.presspahn.com/Products/Mica/COGEBI_FIROX_PYRONAX%20Brochure.pdf)
- [3] Masařík, I. *Plasty a jejich požární nebezpečí*. Ostrava : Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2003, 183 s. ISBN 80-86634-16-7
- [4] Lukeš, M. *Základy požární taktiky - Produkty hoření*. In: <http://www.hmpb.wz.cz> [online]. 12 s. [cit. 18. 1. 2015] Dostupné z: <http://www.hmpb.wz.cz/dokumenty/Produkty%20horeni.doc>
- [5] Fire Testing Technology Ltd, *Industrial Standards* [online]. © 2015 [cit. 18. 1. 2015] Dostupné z: <http://www.fire-testing.com/select-standard>
- [6] ČSN IEC 60331-11. *Zkoušky elektrických kabelů za podmínek požáru - Celistvost obvodu - Část 11: Zařízení - Samostatné hoření při teplotě plamene alespoň 750 °C*. Praha : Český normalizační institut, 2001
- [7] ČSN IEC 60331-21. *Zkoušky elektrických kabelů za podmínek požáru - Celistvost obvodu - Část 23: Postupy a požadavky - Elektrické kabely pro přenos dat*. Praha: Český normalizační institut. 2001.
- [8] ČSN 64 0149. *Stanovení vznětlivosti materiálů*. Praha : Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření, 1978. 8 s.
- [9] Volf, O. *Základy požární taktiky: Požární taktika, Proces hoření*. In: [metodika.cahd.cz](http://metodika.cahd.cz) [online]. Ministerstvo vnitra - Ředitelství hasičského záchranného sboru ČR - Odborná příprava jednotek požární ochrany, 11 s. 4. 2. 2015 [cit. 18. 2. 2015]. Dostupné z: <http://metodika.cahd.cz/konspekty/1-1-01.pdf>
- [10] Morgan, A. B., Wilkie, Ch. A. *Fire Retardancy of Polymeric Materials: An Introduction to Polymeric Flame Retardancy, Its Role in Materials Science, and the Current State of the Field*. Second edition, Boca Raton: CRC Press, 2010, 853 s. ISBN: 978-1-4200-8399-6
- [11] Horák, M. *Pyrolýza*. In: [www.udrzitelnost.cz](http://www.udrzitelnost.cz) [online]. 4 s. 7. 3. 2012 [cit. 20. 2. 2015] Dostupné z: <http://www.udrzitelnost.cz/soubory/pyrolyza.pdf>
- [12] Sain, M., Park, S., Suhara, F., Law, S. *Flame retardant and mechanical properties of natural fibre-PP composites containing magnesium hydroxide*. *Polymer Degradation and Stability*, roč. 83, č. 2, s. 363–367, 02/2004. ISSN: 0141-3910



Analýza dějů provázejících tepelný rozklad kabelové izolace

---

- [13] Skřivan, M. *Bezhalogenové nehořlavé kabely: kabely nové generace. ELEKTRO, časopis pro elektrotechniku* [online]. FCC PUBLIC, roč. 2000, č. 03, ISSN 1210-0889. [cit. 28. 2. 2015]. Dostupné z: [http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=23805](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=23805)
- [14] Lu, S. Y., Hamerton, I. *Recent developments in the chemistry of halogen-free flame retardant polymers. Progress in Polymer Science*, roč. 27, s. 1661–1712, 10/2002. DOI: 10.1016/S0079-6700(02)00018-7
- [15] Affolter, S., Schmid, M. *Thermal analysis experiments with fire-retarded polymers. Mettler Toledo UserCom*, s. 12–16, 2005.
- [16] Kašpar, J. *Stockholmská úmluva byla rozšířena o dalších devět látek* [online]. *Eurochem a Ministerstvo životního prostředí ČR*, 2009. [cit. 20. 1. 2015] Dostupné z: <http://www.eurochem.cz/index.php?LA=CS&MN=Stockholmsk%E1+%FAmluva+byla+roz%9A%ED%F8ena+o+dal%9A%EDch+dev%EC+l%E1tek&ProdID=00021F06D8EDF5860002E8C9&DT=4097&TXTID=2070&PHPSESSID=78a5d45f59bb05c332922001b78b2f9c>
- [17] Šuta, M. *Bromované zpomalovače hoření a jejich rizika. Hospodářské noviny* [online]. 15. 6. 2005 [cit. 20. 2. 2015]. Dostupné z: [http://ihned.cz/2-16302730-000000\\_d-c5](http://ihned.cz/2-16302730-000000_d-c5).
- [18] Awad, W. H. *Recent Developments in Silicon-Based Flame Retardants. Fire Retardancy of Polymeric Materials*, Second edition. Boca Raton: CRC Press, 2010, 853 s. ISBN: 978-1-4200-8399-6
- [19] Sener, A. A., Demirhan, E. *The investigation of using magnesium hydroxide as a flame retardant in the cable insulation material by cross-linked polyethylene. Materials and Design*, roč. 29, s. 1376–1379, 2008. ISSN: 0261-3069
- [20] Sauerwein, R. *New ATH developments drive flame retardant cable compounding. Plastics, Additives and Compounding*, roč. 4, č. 12, s. 22–29, 2002. ISSN: 1464-391X
- [21] Jiang, D. D. *Polymer Nanocomposites. Fire retardancy of Polymeric Materials*. Second edition. Boca Raton: CRC Press, 2010, 853 s. ISBN: 978-1-4200-8399-6
- [22] ČSN EN 50267-2-2. *Společné metody zkoušek pro kabely v podmínkách požáru - Zkoušky plynů vznikajících při hoření materiálů z kabelů - Část 2-2: Postupy - Určení stupně kyselosti plynů během hoření materiálů kabelů měřením pH a vodivosti*. Praha: Český normalizační institut, 1999, 8 s.
- [23] Tůma, J. *Zkoušky kabelů v podmínkách požáru - Normy a požadavky* [prezentace]. Praha, Elektrotechnický zkušební ústav - Laboratoř kabelů a vodičů. 15. 12. 2008.
- [24] *Měření hustoty kouře a dýmu za definovaných podmínek*. In: [www.solace.cz](http://www.solace.cz) [online]. © 2014 [cit. 25. 2. 2015] Dostupné z: <http://www.solace.cz/CZ/Dokumentace/normy/mereni-hustoty-koure.php>.

Analýza dějů provázejících tepelný rozklad kabelové izolace

---

- [25] Schenk, F. *Prezentace Kabelovna KABEX<sup>®</sup> a.s.* [prezentace]. Holýšov, Kabelovna KABEX, a.s., 2011.
- [26] ČSN EN 60332-3-22. *Zkoušky elektrických a optických kabelů v podmínkách požáru – Část 3-22: Zkouška vertikálního šíření plamene na vertikálně namontovaných svazcích vodičů nebo kabelů.* Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010, 16 s.
- [27] Mleziva, J., Šňupárek, J. *Polymery - výroba, struktura, vlastnosti a použití*, 2. doplněné vydání. Praha: Sobotáles, 2000, 537 s. ISBN 80-85920-72-7.
- [28] ČSN EN 50200. *Zkušební metoda odolnosti při požáru pro nechráněné kabely malých průměrů určených pro použití v nouzových obvodech* ed. 2. Praha: Český normalizační institut, 2007, 28 s.
- [29] ČSN EN 50362. *Zkušební metoda odolnosti při požáru pro nechráněné silové a ovládací kabely velkých průměrů pro použití v nouzových obvodech.* Praha: Český normalizační institut, 2003, 20 s.
- [30] *ZKUŠEBNÍ PŘEDPIS ZP – 27/2008 Pro stanovení třídy funkčnosti kabelů a kabelových nosných konstrukcí – kabelových tras v případě požáru.* Praha: PAVUS, a.s. autorizovaná osoba 216, 2008, 17 s.
- [31] Pelikán, L. *Požární bezpečnost elektrických rozvodů z pohledu vyhl. 23/2008 Sb . a předpisů souvisejících.* Praha: PRAKAB Pražská kabelovna, a.s., 2009, 25 s.
- [32] ČSN EN 50399. *Zkušební metody kabelů v podmínkách požáru - Měření uvolněného tepla a kouře na kabelech v průběhu zkoušky šíření plamene - Zkušební zařízení, postupy a výsledky.* Praha: ÚNMZ - Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012, 56 s.
- [33] Hees, P. V. *Fire Performance of Electric Cables - New test methods and measurement techniques (FIPEC)* [online]. FIPEC Consortium, 8. 5. 2006 [cit. 1. 3. 2015]. Dostupné z: <http://ec.europa.eu/research/growth/warsaw/posters/pano-43-s-36.pdf>
- [34] Košťál, J. *Teplotní závislost odporu kovových vodičů.* *ELEKTRO, časopis pro elektrotechniku*, roč. 20, s. 1–2, 2008. ISSN 1210-0889
- [35] *The International Annealed Copper Standard* [online]. International Electrotechnical Commission, 3. 6. 2015 [cit. 6. 6. 2015]. Dostupné z: <https://www.nde-ed.org/GeneralResources/IACS/IACS.htm>
- [36] Beaty, H. W., Fink, G. D. *Standard Handbook for Electrical Engineers*, 16. edice. New York: McGraw-Hill Professional Publishing, 2012, 2144 s. ISBN 9780071762328
- [37] Cardarelli, F. *Materials Handbook: A Concise Desktop Reference*, 2. edice. Londýn: Springer-Verlag London, 2008, 1340 s. ISBN 978-1-84628-668-1

Analýza dějů provázejících tepelný rozklad kabelové izolace

---

- [38] Buchlovský, E., Houžvička, F., Grešík, P. *Výroba kabelů a vodičů*, První vydání. Praha, 1986, 440 s.
- [39] Blythe, T., Bloor, D. *Electrical Properties of Polymers*. New York: Cambridge University Press, 2008, 496 s. ISBN 978-0-12-633680-1
- [40] Mitchell, B. S. *An introduction to materials engineering and science for chemical and materials engineers*. Hoboken, NJ, USA: A JOHN WILEY & SONS, INC., 2003, 958 s. ISBN 978-0-471-43623-2
- [41] Lenfeld, P. *Plasty a jejich zpracovatelské vlastnosti: Technologie zpracování plastů* [online]. 2008 [cit. 6. 6. 2015]. Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce\\_plasty/01.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm).
- [42] Kupilík, V. *Vliv struktury na vlastnosti a zpracovatelnost plastů* [online]. Praha: Katedra konstrukcí pozemních staveb, Fakulta stavební, ČVUT v Praze, 5 s., 2006 [cit. 6. 6. 2015]. Dostupné z: [http://people.fsv.cvut.cz/www/wald/Pozarni\\_odolnost/e-text/specialiste/4/4-2\\_Vliv\\_struktury\\_plastu.pdf](http://people.fsv.cvut.cz/www/wald/Pozarni_odolnost/e-text/specialiste/4/4-2_Vliv_struktury_plastu.pdf)
- [43] Beyler, C. L., Hirschler, M. M. *Thermal Decomposition of Polymers. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 3rd Edition, Massachusetts: National Fire Protection Association, Inc., 2005, s. 110–131. ISBN 0877653542
- [44] Zelinger, J., Kuta, A., Štěpek, J. *Technologie zpracování a vlastnosti plastů*. Praha: SNTL - Státní nakladatelství technické literatury, 1989, p. 638. ISBN 04-602-89
- [45] ČSN ISO 4589-2. *Plasty - Stanovení hořlavosti metodou kyslíkového čísla. Část 2, Zkouška při teplotě okolí*. Praha: Český normalizační institut, 1998. 28 s.
- [46] Voženílek, J. *Vedení elektrického proudu v plynech a ve vakuu* [online]. Liberec: Gymnázium F. X. Šaldy, p. 12, 2006. [cit. 8. 6. 2015]. Dostupné z: <http://jan.gfxs.cz/studium/files/elektro/plyny.pdf>
- [47] Klaus, P., Tomčík, P., Mohyla, P. *Electrical properties of flame from methane and oxygen mixture* [online]. *Metal 2012 - 21. mezinárodní konference metalurgie a materiálů*, Brno. [cit. 8. 6. 2015]. Dostupné z: <http://konsys-t.tanger.cz/files/proceedings/02/reports/207.pdf>
- [48] van den Boom, J. D. B. J., Konnov, A. a., Verhasselt, A. M. H. H., Kornilov, V. N., de Goeij, L. P. H., Nijmeijer, H. *The effect of a DC electric field on the laminar burning velocity of premixed methane/air flames. Proceedings of the Combustion Institute*, roč. 32, č. 1, s. 1237–1244, 01/2009. ISSN 15407489
- [49] Belhi, M., Domingo, P., Vervisch, P. *Direct numerical simulation of the effect of an electric field on flame stability. Combustion and Flame*, roč. 157, č. 12, s. 2286–2297, 12/ 2010. ISSN 00102180
- [50] Fialkov, A. B. *Investigations on ions in flames. Progress in Energy and Combustion Science*, roč. 23, s. 399–528, 1997. ISSN 0360-1285/97

Analýza dějů provázejících tepelný rozklad kabelové izolace

---

- [51] IEC 60331-21. *Tests for electric cables under fire conditions - Circuit integrity - Part 21: Procedures and requirements - Cables of rated voltage up to and including 0,6/1,0 kV*. International Electrotechnical Commission, 1999.
- [52] Stone, G. C., Culbert, I., Boulter, E. A., Dhirani, H. *Electrical Insulation for Rotating Machines*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2004, p. 371. ISBN: 9781118886663
- [53] Chou, Y.-S., Stevenson, J. W., Singh, P. *Thermal cycle stability of a novel glass–mica composite seal for solid oxide fuel cells: Effect of glass volume fraction and stresses*, *Journal of Power Sources*, roč. 152, s. 168–174, 12/2005. ISSN 03787753
- [54] Snyder, C. E., Gschwender, L. J. *Fluoropolymers in fluid and lubricant applications. Industrial Engineering Chemistry Product Research and Development*, roč. 22, č. 3, s. 383–386, 09/1983. ISSN 0196-4321
- [55] Ebnesajjad, S., Khaladkar, P. R. *Fluoropolymer Applications in the Chemical Processing Industries: The Definitive User's Guide and Databook*, První edice. New York: William Andrew, 2005, 592 s. ISBN: 978-0815515029
- [56] Bijwe, J., Sharma, S., Sharma, M., Parida, T., Trivedi, P. *Exploration of potential of solid lubricants and short fibers in Polyetherketone (PEK) composites*. *Wear*, roč. 301, č. 1–2, s. 810–819, 03/2013. ISSN 00431648
- [57] LEONI Studer AG. *Effective Fire barriers for Cables* [online]. 08/2011. [cit. 15. 6. 2015]. Dostupné z: [http://www.leoni-infrastructure-datacom.com/fileadmin/bu/id/news\\_medien/LEONI\\_Kundeninformation/KdInfo\\_Glimmerbaender\\_e\\_V9.pdf](http://www.leoni-infrastructure-datacom.com/fileadmin/bu/id/news_medien/LEONI_Kundeninformation/KdInfo_Glimmerbaender_e_V9.pdf)
- [58] Haurie, L., Fernández, A. I., Velasco, J. I., Chimenos, J. M., Lopez Cuesta, J.-M., Espiell, F. *Synthetic hydromagnesite as flame retardant. Evaluation of the flame behaviour in a polyethylene matrix*. *Polymer Degradation and Stability*, roč. 91, č. 5, s. 989–994, 05/2006. ISSN 01413910
- [59] Haurie, L., Fernández, A. I., Velasco, J. I., Chimenos, J. M., Lopez Cuesta, J.-M., Espiell, F. *Thermal stability and flame retardancy of LDPE/EVA blends filled with synthetic hydromagnesite/aluminium hydroxide/montmorillonite and magnesium hydroxide/aluminium hydroxide/montmorillonite mixtures*. *Polymer Degradation and Stability*, roč. 92, č. 6, s. 1082–1087, 06/2007. ISSN 01413910
- [60] Chuang, T., Guo, W., Cheng, K. *Thermal properties and flammability of ethylene-vinyl acetate copolymer/montmorillonite/polyethylene nanocomposites with flame retardants*. *Journal of Polymer Research*, roč. 11, s. 169–174, 2004. ISSN 8862277121
- [61] Wang, Z., Han, E., Ke, W. *Effect of acrylic polymer and nanocomposite with nano-SiO<sub>2</sub> on thermal degradation and fire resistance of APP–DPER–MEL coating*. *Polymer Degradation and Stability*, roč. 91, č. 9, s. 1937–1947, 09/2006. ISSN 01413910

Analýza dějů provázejících tepelný rozklad kabelové izolace

---

- [62] Hendrickson, L., Connole, K. B. *Review of stabilization of polyolefin insulated conductors. Part I: Theory and factors affecting stability. Polymer Engineering and Science*, roč. 35, č. 2, s. 211–217, 01/1995. ISSN 0032-3888
- [63] Brems, A., Baeyens, J., Beerlandt, J., Dewil, R. *Thermogravimetric pyrolysis of waste polyethylene-terephthalate and polystyrene: A critical assessment of kinetics modelling. Resources, Conservation and Recycling*, roč. 55, č. 8, s. 772–781, 06/2011. ISSN 09213449
- [64] Yoshioka, T., Grause, G., Eger, C., Kaminsky, W., Okuwaki, A. *Pyrolysis of poly(ethylene terephthalate) in a fluidised bed plant, Polymer Degradation and Stability*, roč. 86, č. 3, s. 499–504, 12/2004. ISSN 01413910
- [65] Marcilla, A., Ruiz-Femenia, R., Hernández, J., García-Quesada, J. C. *Thermal and catalytic pyrolysis of crosslinked polyethylene. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, roč. 76, č. 1–2, s. 254–259, 06/2006. ISSN 01652370
- [66] Hinsken, H., Moss, S., Pauquet, J.-R., Zweifel, H. *Degradation of polyolefins during melt processing, Polymer Degradation and Stability*, roč. 34, č. 1–3, s. 279–293, 01/1991. ISSN 01413910
- [67] Peterson, J. D., Vyazovkin, S., Wight, C. a. *Kinetics of the Thermal and Thermo-Oxidative Degradation of Polystyrene, Polyethylene and Poly(propylene). Macromolecular Chemistry and Physics*, roč. 202, č. 6, s. 775–784, 03/2001. ISSN 1022-1352
- [68] Nóbrega, A. M., Alencar de Queiroz, M. L. B. M. A. A. *Investigation and Analysis of Electrical Aging of XLPE Insulation for Medium Voltage Covered Conductors Manufactured in Brazil. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, roč. 20, č. 2, s. 628–640, 2013. ISSN 1070-9878
- [69] Hamdani, S., Longuet, C., Perrin, D., Lopez-cuesta, J.-M., Ganachaud, F. *Flame retardancy of silicone-based materials. Polymer Degradation and Stability*, roč. 94, č. 4, s. 465–495, 04/2009. ISSN 01413910
- [70] Santra, R. N. , Mukunda, P. G., Nando, G. B., Chaki, T. K. *Thermogravimetric studies on miscible blends of ethylene-methyl acrylate copolymer (EMA) and polydimethylsiloxane rubber (PDMS). Thermochemica Acta*, roč. 219, s. 283–292, 05/1993. ISSN 00406031
- [71] Jana, R., Mukunda, P., Nando, G. *Thermogravimetric analysis of compatibilized blends of low density polyethylene and poly(dimethyl siloxane) rubber. Polymer Degradation and Stability*, roč. 80, č. 1, s. 75–82, 01/2003. ISSN 01413910
- [72] Mcneil, I. C., Mohammed, M. H. *Thermal analysis of blends of low density polyethylene , poly (ethyl acrylate) and ethylene ethyl acrylate copolymer with polydimethylsiloxane,” Polymer Degradation and Stability*, roč. 50, s. 285–295, 1995. ISSN 01413910

Analýza dějů provázejících tepelný rozklad kabelové izolace

---

- [73] Camino, G., Lomakin, S., Lageard, M. *Thermal polydimethylsiloxane degradation. Part 2. The degradation mechanisms. Polymer*, roč. 43, č. 7, s. 2011–2015, 03/2002. ISSN 00323861
- [74] Camino, G., Lomakin, S., Lazzari, M. *Polydimethylsiloxane thermal degradation Part 1. Kinetic aspects. Polymer*, roč. 42, č. 6, s. 2395–2402, 03/2001. ISSN 00323861
- [75] Chen, Y., Zou, H., Liang, M., Cao, Y. *Melting and crystallization behavior of partially miscible high density polyethylene/ethylene vinyl acetate copolymer (HDPE/EVA) blends. Thermochimica Acta*, roč. 586, s. 1–8, 06/2014. ISSN 00406031
- [76] Khonakdar, H. a., Jafari, S. H., Yavari, A., Asadinezhad, A., Wagenknecht, U. *Rheology, Morphology and Estimation of Interfacial Tension of LDPE/EVA and HDPE/EVA Blends. Polymer Bulletin*, roč. 54, č. 1–2, s. 75–84, 04/2005. ISSN 0170-0839
- [77] Takidis, G., Bikiaris, D. N., Papageorgiou, G. Z., Achilias, D. S., Sideridou, I. *Compatibility of Low-Density Polyethylene / Poly ( ethylene- co -vinyl acetate ) Binary Blends Prepared by Melt Mixing. Journal of Applied Polymer Science*, roč. 90, s. 841–852, 2003. ISSN 1097-4628
- [78] Agroui, K., Collins, G., Farenc, J. *Measurement of glass transition temperature of crosslinked EVA encapsulant by thermal analysis for photovoltaic application. Renewable Energy*, roč. 43, s. 218–223, 08/2012. ISSN 09601481
- [79] Stark, W., Jaunich, M. *Investigation of Ethylene/Vinyl Acetate Copolymer (EVA) by thermal analysis DSC and DMA. Polymer Testing*, roč. 30, č. 2, s. 236–242, 04/2011. ISSN 01429418
- [80] Agroui, K., Maallemi, A., Boumaour, M., Collins, G., Salama, M. *Thermal stability of slow and fast cure EVA encapsulant material for photovoltaic module manufacturing process. Solar Energy Materials and Solar Cells*, roč. 90, č. 15, s. 2509–2514, 09/2006. ISSN 09270248
- [81] dos Santos, W. N., de Sousa, J. a., Gregorio, R. *Thermal conductivity behaviour of polymers around glass transition and crystalline melting temperatures. Polymer Testing*, roč. 32, č. 5, s. 987–994, 08/2013. ISSN 01429418
- [82] Rahaman, M., Chaki, T. K., Khastgir, D. *Temperature Dependent Electrical Properties of Conductive Composites (Behavior at Cryogenic Temperature and High Temperatures. Advanced Materials Research*, roč. 123–125, s. 447–450, 08/2010. ISSN 1662-8985
- [83] Maya, E. M., Benavente, J., de Abajo, J. *Effect of the carboxylic acid groups on water sorption, thermal stability and dielectric properties of polyimide films. Materials Chemistry and Physics*, roč. 131, č. 3, s. 581–588, 01/2012. ISSN 02540584

Analýza dějů provázejících tepelný rozklad kabelové izolace

---

- [84] Tomozawa, M. *Electrical resistivity of silica glasses*, *Journal of Non-Crystalline Solids*, roč. 163, č. 2, s. 203–210, 11/1993. ISSN 00223093
- [85] *Vyhláška č. 268/2011 Sb., kterou se mění vyhláška č. 23/2008 Sb., o technických podmínkách požární ochrany staveb*. Praha: Sbírka zákonů č. 268 / 2011., 6 S., 2011.
- [86] *Rozhodnutí Komise 2000/147/ES, kterým se provádí směrnice Rady 89/106/EHS, pokud jde o klasifikaci reakce stavebních výrobků na oheň ve znění RK 2003/632/ES a RK 2006/751/ES*. 11 s. 2006.
- [87]
- [88] Mentlík, V., Pihera, J., Polanský, R., Prosr, P., Trnka, P., *Diagnostika elektrických zařízení*. Praha: nakladatelství BEN - technická literatura, 2008, 440 s. ISBN: 978-80-7300-232-9
- [89] Dielectric Constant. *Encyclopædia Britannica* [online]. 2015. [cit. 20. 6. 2015]  
Dostupné z: <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/162637/dielectric-constant>.

## Seznam autorčiných publikací

- **impaktované časopisy:**

- [1] POLANSKÝ, R., PROSR, P., MENTLÍK, V., **PINKEROVÁ, M.** Thermal and voltage treatments of silicone/mica high-temperature electrical insulation. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2012, roč. 88, č. 8, s. 249-254. ISSN: 0033-2097
- [2] POLANSKÝ, R., **PINKEROVÁ, M.**, BARTUŇKOVÁ, M., PROSR, P. Mechanical behavior and thermal stability of EVA encapsulant material used in photovoltaic modules. *Journal of ELECTRICAL ENGINEERING*, 2013, roč. 64, č. 6, s. 361-365. ISSN: 1335-3632
- [3] POLANSKÝ, R., **POLANSKÁ, M.** Testing of the fire-proof functionality of cable insulation under fire conditions via insulation resistance measurements. *Engineering Failure Analysis*, 2015, č. 57, s. 334-349. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2015.08.001.

- **recenzované časopisy:**

- [4] **PINKEROVÁ, M.**, POLANSKÝ, R. Nové trendy v materiálech používaných pro izolaci a opláštění kabelů. *Electroscope*, 2012, roč. 1, č. III., s. 1-5. ISSN: 1802-4564
- [5] **PINKEROVÁ, M.**, POLANSKÝ, R. Využití termických analýz k diagnostice polymerů. *Elektro*, 2013, roč. 23, č. 1, s. 6-10. ISSN: 1210-0889

- **ostatní časopisy:**

- [6] **PINKEROVÁ, M.** Zdravotní (ne)závadnost kabelových izolací. *Elektroinstalátér*, 2011, roč. 17, č. 6, s. 10-11. ISSN: 1211-2291

- **kvalifikační práce:**

- [7] **PINKEROVÁ, M.** Keramika v elektrotechnice. <bakalářská práce> FEL ZČU v Plzni: Plzeň, 2008. 42 s.
- [8] **PINKEROVÁ, M.** Diagnostický systém pro hodnocení materiálů kabelových plášťů. <diplomová práce> FEL ZČU v Plzni: Plzeň, 2010. 85 s.
- [9] **PINKEROVÁ, M.** Strukturální analýzy a jejich aplikace při diagnostice polymerů. <písemná práce ke státní doktorské zkoušce> FEL ZČU v Plzni: Plzeň, 2011, 42 s.

- **články ze zahraničních konferencí:**

- [10] **PINKEROVÁ, M.**, POLANSKÝ, R. Influence of cross-linking on properties of PEVA used for cable sheaths. In *Annals of DAAAM for 2011 & Proceedings of the 22nd International DAAAM Symposium*. Vienna: DAAAM International Vienna 2011, 2011. s. 975-976. ISBN: 978-3-901509-83-4, ISSN: 1726-9679
- [11] POLANSKÝ, R., PROSR, P., **PINKEROVÁ, M.** Investigation of encapsulant material used in photovoltaic modules by thermal analyses. In *Annals of DAAAM for*



Analýza dějů provázejících tepelný rozklad kabelové izolace

2011 & Proceedings. Vienna: DAAAM International Vienna, 2011. s. 409-410. ISBN: 978-3-901509-83-4, ISSN: 1726-9679

- [12] **PINKEROVÁ, M.**, POLANSKÝ, R. Analysis of thermal and mechanical properties of cable insulations designed for operation under emergency conditions. In *Annals of DAAAM for 2012 & Proceedings of the 23rd International DAAAM Symposium*. Vienna: DAAAM International, 2012. s. 679-684. ISBN: 978-3-901509-91-9, ISSN: 2304-1382
- [13] POLANSKÝ, R., PROSR, P., **PINKEROVÁ, M.**, VESELÝ, O. Changes in electrical insulation properties of fire resistant cables during a fire incident. In *11th International Conference on Solid Dielectrics (ICSD)*. Piscataway: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2013. s. 670-673. ISBN: 978-1-4799-0807-3, ISSN: 1553-5282

- **články z českých konferencí:**

- [14] **PINKEROVÁ, M.** Diagnostický systém pro hodnocení materiálů kabelových plášťů. In *Elektrotechnika a informatika 2010; část první - Elektrotechnika*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2010. s. 81-84. ISBN: 978-80-7043-913-5
- [15] **PINKEROVÁ, M.**, MENTLÍK, V. Diagnostic system for cable insulation materials. In *Diagnostika '11*. Pilsen: University of West Bohemia, 2011. s. 136-140. ISBN: 978-80-261-0020-1
- [16] **PINKEROVÁ, M.**, POLANSKÝ, R. Měření vlastností síťovaného a nesíťovaného kabelového pláště (PEVA) pomocí termických analýz. In *Elektrotechnika a informatika 2011; část první - Elektrotechnika*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2011. s. 95-98. ISBN: 978-80-261-0016-4
- [17] **PINKEROVÁ, M.**, POLANSKÝ, R. Vliv teploty na mechanické vlastnosti kabelových plášťů. In *Proceedings of the 13th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2012*. Brno: Brno University of Technology, 2012. s. 797-800. ISBN: 978-80-214-4514-7
- [18] POLANSKÝ, R., PROSR, P., **PINKEROVÁ, M.** Stanovení tepelné odolnosti elektroizolačního materiálu pomocí termických analýz. In *Proceedings of the 13th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2012*. Brno: Brno University of Technology, 2012. s. 849-852. ISBN: 978-80-214-4514-7
- [19] **PINKEROVÁ, M.**, POLANSKÝ, R. Hodnocení mechanických vlastností kabelů. In *Elektrotechnika a informatika 2012. Část 1., Elektrotechnika*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2012. s. 101-104. ISBN: 978-80-261-0120-8
- [20] **PINKEROVÁ, M.**, BARTŮŇKOVÁ, M., POLANSKÝ, R. Comparison of temperature limits of cable sheaths measured by dynamic thermo mechanical analysis. In *International conference Diagnostika '13 Conference on Diagnostics in Electrical Engineering CDEE 2013*. Pilsen: University of West Bohemia, 2013. s. 66-69. ISBN: 978-80-261-0210-6
- [21] **PINKEROVÁ, M.**, VESELÝ, O., POLANSKÝ, R. Ohniodolné kabely a vývoj jejich elektrických vlastností během požáru. In *Proceedings of the 14th international scientific conference Electric power and engineering 2013*. Ostrava: VSB - Technical University, 2013. s. 01-05. ISBN: 978-80-248-2988-3

Analýza dějů provázejících tepelný rozklad kabelové izolace

---

- [22] **PINKEROVÁ, M., POLANSKÝ, R.** Vývoj izolačního odporu kabelu s funkční schopností při požáru během požární zkoušky. In *Elektrotechnika a informatika 2013. Část 1., Elektrotechnika*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2013. s. 107-110. ISBN: 978-80-261-0233-5
- [23] POLANSKÝ, R., **POLANSKÁ, M.** Využití izolačního odporu k analýze dějů doprovázejících tepelný rozklad kabelové izolace. In *Sborník příspěvků 37. Mezinárodní český a slovenský kalorimetrický seminář (KALSEM 2015)*. Trešť: Univerzita Pardubice, 2015. s 63 – 66. ISBN: 978-80-7395-899-2

## **Seznam příloh**

*Příloha A - Zkouška funkční schopnosti kabelových systémů při požáru*

*Příloha B - Příloha č. 2 vyhlášky MV č. 268/2011 Sb.*

*Příloha C - Klasifikace kabelů podle jejich reakce na oheň*

**Příloha A - Zkouška funkční schopnosti kabelových systémů při požáru**

Zkrácený záznam a stručná dokumentace průběhu zkoušky funkčnosti kabelových tras při požáru podle zkušební metody STN 92 02045:2012 a ZP-27/2008 budou představeny v několika dalších odstavcích. Zkouška byla provedena v laboratoři Fires, s.r.o. Batizovce, Slovenská republika (obr. A-1).

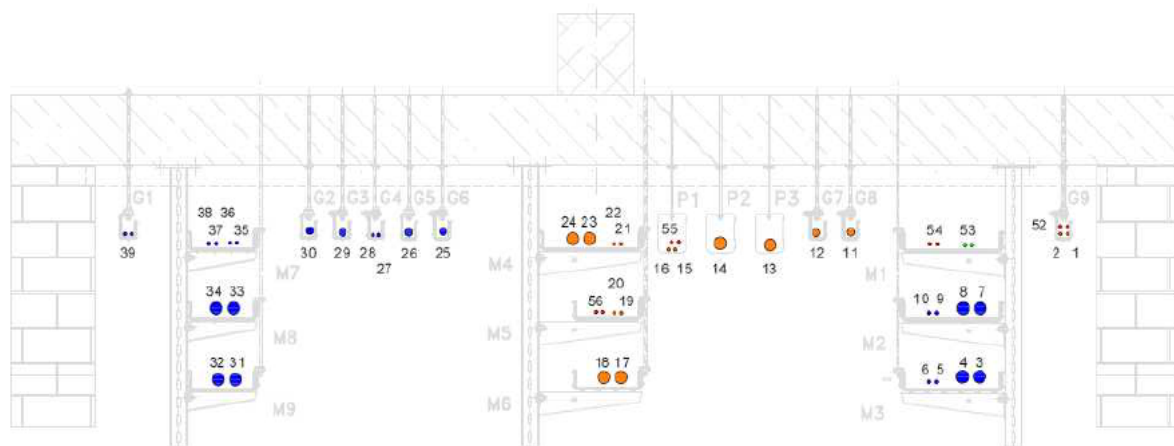


Obr. A-1: Budova sídla a zkušebny společnosti Fires, s.r.o.

Účelem zkoušky bylo získání informací pro klasifikaci následujících výrobků:

Kabely typu:	1-CSKE-V 4x1,5 /h/P90-R/	12x
	1-CSKE-V 4x2,5 /h/P90-R/	2x
	1-CSKE-V 5x10 /h/P90-R/	4x
	1-CSKE-V 4x50 /h/P90-R/	6x
	JCSFE-V 1x2x0,8 /h/P90-R/	12x

Délka vzorků kabelů byla 4,5 m, délka vystavená tepelnému namáhání 3,7 m. Zkouška byla vykonána ve vodorovné zkušební komoře o rozměrech 3700 x 3000 x 2850 mm. Podmínky ve zkušební komoře během zkoušky – normová teplotní křivka, tlak, koncentrace kyslíku – byly v souladu s STN EN 1363-1 „*Skúšanie požiarnej odolnosti. Časť 1: Základné požiadavky*“. Prostupy kabelů skrz stěny komory byly utěsněné minerální vlnou. Na ekvivalentní zatížení byly použity ocelové řetězy a ocelová závaží. Rozmístění kabelů ve zkušební komoře a jejich umístění na různé druhy podpěrných konstrukcí schematicky znázorňuje obr. A-2 a A-3.



Obr. A-2: Průřez zkušební komorou

**Podpěrné kabelové konstrukce použité během zkoušky byly následujících typů:**

- **Trasy M1, M4, M5, M6** – nenormové kabelové trasy z drátěných kabelových žlabů upevněné na společné závěsné konstrukci pod stropem zkušební komory; celkové zatížení trasy M1 a M4 bylo 10 kg/m a tras M5 a M6 7,5 kg/m; tabulka výsledků:

trasa	vzorek kabelu	doba funkčnosti
M1	JCSFE-V 1x2x0,8 /h/P90-R/	90 min
M1	JCSFE-V 1x2x0,8 /h/P90-R/	86 min
M4	1-CSKE-V 4x1,5 /h/P90-R/	71 min
M4	1-CSKE-V 4x1,5 /h/P90-R/	81 min
M4	1-CSKE-V 4x50 /h/P90-R/	38 min
M4	1-CSKE-V 4x50 /h/P90-R/	90 min
M5	JCSFE-V 1x2x0,8 /h/P90-R/	82 min
M5	JCSFE-V 1x2x0,8 /h/P90-R/	81 min
M5	1-CSKE-V 4x1,5 /h/P90-R/	85 min
M5	1-CSKE-V 4x1,5 /h/P90-R/	72 min
M6	1-CSKE-V 4x50 /h/P90-R/	74 min
M6	1-CSKE-V 4x50 /h/P90-R/	65 min
M6	1-CSKE-V 4x50 /h/P90-R/	74 min
M6	1-CSKE-V 4x50 /h/P90-R/	65 min

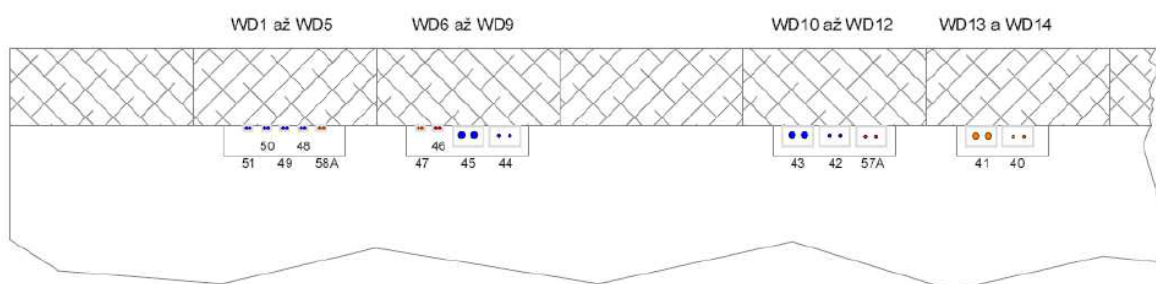
- **Trasy G7, G8, G9** – nenormové, samostatně instalované trasy z drátěného kabelového žlabu s profilem tvaru písmena G upevněného pod stropem zkušební komory; v každé trase byla vytvořená změna směrového vedení trasy ve tvaru „S“; celkové zatížení 1,25 kg/m; tabulka výsledků:

## Analýza dějů provázejících tepelný rozklad kabelové izolace

trasa	vzorek kabelu	doba funkčnosti
G7	1-CSKE-V 5x10 /h/P90-R/	38 min
G8	1-CSKE-V 5x10 /h/P90-R/	46 min
G9	1-CSKE-V 4x1,5 /h/P90-R/	90 min
G9	1-CSKE-V 4x1,5 /h/P90-R/	90 min
G9	JCSFE-V 1x2x0,8 /h/P90-R/	90 min
G9	JCSFE-V 1x2x0,8 /h/P90-R/	90 min

- **Trasy P1, P2, P3** – samostatné trasy vytvořené ze skupinových kabelových držáků (kabelových spon), vzdálenost upevnění 500 mm; v každé trase byla vytvořena změna směrového vedení trasy ve tvaru „S“; zatížení každé trasy 6,1 kg/m; tabulka výsledků:

trasa	vzorek kabelu	doba funkčnosti
P1	1-CSKE-V 4x1,5 /h/P90-R/	82 min
P1	1-CSKE-V 4x1,5 /h/P90-R/	77 min
P1	JCSFE-V 1x2x0,8 /h/P90-R/	86 min
P1	JCSFE-V 1x2x0,8 /h/P90-R/	82 min
P2	1-CSKE-V 4x50 /h/P90-R/	90 min
P3	1-CSKE-V 4x50 /h/P90-R/	90 min



Obr. A-3: Boční pohled na zkušební komoru

- **Trasy WD5, WD6, WD7** – nenormové, samostatně instalované trasy z kovových úložných kanálů upevněných přímo ke stropu zkušební komory; v každé trase byla vytvořena změna směrového vedení trasy ve tvaru „S“; celkové zatížení 0,25 kg/m; tabulka výsledků:

## Analýza dějů provázejících tepelný rozklad kabelové izolace

trasa	vzorek kabelu	doba funkčnosti
WD5	JCSFE-V 1x2x0,8 /h/P90-R/	46 min
WD5	JCSFE-V 1x2x0,8 /h/P90-R/	46 min
WD6	1-CSKE-V 4x1,5 /h/P90-R/	90 min
WD6	1-CSKE-V 4x2,5 /h/P90-R/	41 min
WD7	1-CSKE-V 4x1,5 /h/P90-R/	90 min
WD7	1-CSKE-V 4x2,5 /h/P90-R/	41 min

- **Trasy WD12, WD13, WD14** – nenormové, samostatně instalované trasy z kovových úložných kanálů upevněných přímo ke stropu zkušební komory; v každé trase byla vytvořená změna směrového vedení trasy ve tvaru „S“; celkové zatížení 1,25 kg/m; tabulka výsledků:

trasa	vzorek kabelu	doba funkčnosti
WD12	JCSFE-V 1x2x0,8 /h/P90-R/	90 min
WD12	JCSFE-V 1x2x0,8 /h/P90-R/	90 min
WD13	1-CSKE-V 5x10 /h/P90-R/	61 min
WD13	1-CSKE-V 5x10 /h/P90-R/	61 min
WD14	1-CSKE-V 4x1,5 /h/P90-R/	90 min
WD14	1-CSKE-V 4x1,5 /h/P90-R/	90 min

## Fotodokumentace průběhu zkoušky:



Obr. A-4: Pohled na vzorky ve zkušební komoře před zkouškou; trasy M4 až M6 zatížené ocelovými řetězy



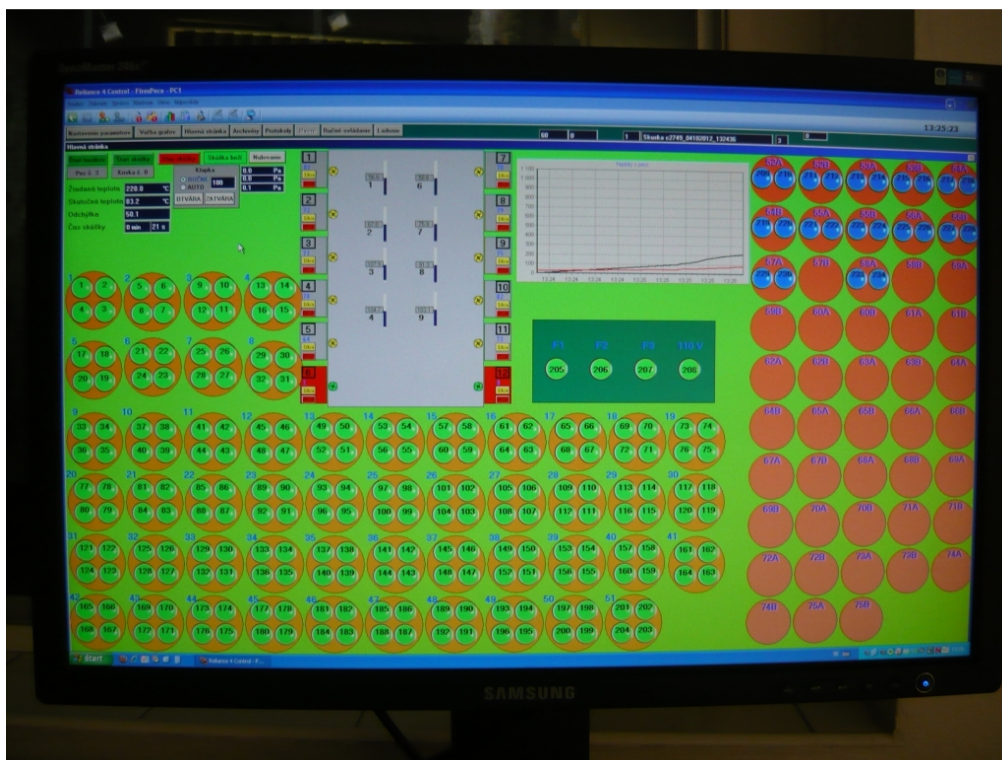
Analýza dějů provázejících tepelný rozklad kabelové izolace



Obr. A-5: Pohled na vzorky ve zkušební komoře před zkouškou; v horní části fotografie je vidět změna směrového vedení trasy ve tvaru „S“ kabelů s hnědým pláštěm, jedná se o trasy G2 až G6; trasy ve spodní části fotografie jsou trasy M7 až M9



Obr. A-6: Prostupy kabelů skrz stěnu zkušební komory – foceně zvenku komory – trasy M7 až M9



Obr. A-7: Ukázka software pro kontrolu funkčnosti jednotlivých tras během zkoušky





Obr. A-8: Zkušební komora zvenku přibližně po třiceti minutách zkoušky



Obr. A-9: Pohled na velín a připojené kontrolní žárovky ke každé zkoušené trase (30 min od začátku zkoušky)



Obr. A-10: Pohled skrz kontrolní okénko do zkušební komory ve třicáté minutě zkoušky



Obr. A-11: Pohled na kabely a kabelové žlaby po 90 minutové zkoušce  
(trasy M7 až M9, v levé horní části fotografie trasy G2 až G6)





Obr. A-12: Pohled na kabely a kabelové žlaby po 90 minutové zkoušce (trasy M4 až M6)



Obr. A-13: Pohled na kabelové trasy po 90 minutové zkoušce (trasy P1 až P3 ve sponách, v levé části trasy G7 a G8 v drátěných žlabech)



Obr. A-14: Pohled na kabely a kabelové žlaby po 90 minutové zkoušce v trase M6





Obr. A-15: Pohled na kabelové kanály po 90 minutové zkoušce v trase WD7 až WD9



Obr. A-16: Pohled na kabely a kabelové žlaby po 90 minutové zkoušce v trasách G7 a G8



Obr. A-17: Pohled na kabely a kabelový žlab po 90 minutové zkoušce v trase G9

Analýza dějů provázejících tepelný rozklad kabelové izolace

---

Tato zkouška byla prováděna pouze jako informativní. V případě potřebné kvalifikace by vyhověly (tím je myšleno vždy četnost 2 podle ZP 27-2008) kabely:

- 1-CSKE-V 4x1,5 /h/P90-R/ v kabelovém žlabu G9
- 1-CSKE-V 4x1,5 /h/P90-R/ v kabelovém kanálu WD14
- JCSFE-V 1x2x0,8 /h/P90-R/ v kabelovém žlabu G9
- JCSFE-V 1x2x0,8 /h/P90-R/ v kabelovém kanálu WD12

Z výsledků zkoušky je poměrně zřetelné, jak je toto zkoušení pro výrobce kabelů finančně i časově náročné. Tím spíše jsou nuceni vyvíjet snahu a podchycovat na trhu cenově dostupnější „ohniodolné kabely“, které se však jako takové často jen tváří, a zjištěné nedostatky nahlašovat České obchodní inspekci. Takové téma aktuálně řeší Asociace výrobců kabelů a vodičů, která sdružuje kabelovny České a Slovenské republiky, a která se mimo jiné zapojuje i do tvorby, úprav, případně překladů českých technických norem.

**Příloha B – Příloha č. 2 vyhlášky MV č. 268/2011 Sb.**

Tabulka B-1: Druhy a vlastnosti volně vedených vodičů a kabelů elektrických rozvodů [85]

A. Volně vedené kabely a vodiče zajišťující funkci a ovládání požárně bezpečnostních zařízení		Druh kabelu			
		I	II	III	IV
a)	domácí rozhlas, evakuační rozhlas, zařízení pro vizuální vyhlášení poplachu, nouzový zvukový systém		x	x	x
b)	nouzové a protipanické osvětlení		x	x	x
c)	osvětlení chráněných únikových cest a zásahových cest			x	x
d)	evakuační a požární výtahy		x	x	x
e)	větrání únikových cest			x	x
f)	stabilní hasicí zařízení		x	x	x
g)	elektrická požární signalizace		x	x	x
h)	zařízení pro odvod kouře a tepla		x	x	x
i)	posilovací čerpadla požárního vodovodu		x	x	x
<b>B. Volně vedené vodiče a kabely zajišťující funkci zařízení, jejichž chod je při požáru nezbytný k ochraně osob, zvířat a majetku v prostorech požárních úseků vybraných druhů staveb</b>					
a)	zdravotnická zařízení				
	jesle, lůžková oddělení nemocnic, JIP, ARO, operační sály, lůžkové části zařízení sociální péče	x		x	
b)	stavby s vnitřními shromažďovacími prostory (například školy, divadla, kina, kryté haly, kongresové sály, nákupní střediska, výstavní prostory, odbavovací haly letištních, železničních a autobusových terminálů)				
	1. shromažďovací prostor	x			
	2. prostory určené pro veřejnost	x		x	
c)	stavby pro bydlení (mimo rodinné domy)				
	1. únikové cesty			x	
d)	stavby pro ubytování více než 20 osob (např. hotely, internáty, lázně, koleje, ubytovny apod.)				
	1. společné prostory (haly, recepce, jídelny, menzy, restaurace)	x		x	
Vysvětlivky	<i>I – kabel třídy reakce na oheň D<sub>ca</sub></i> <i>II – kabel třídy reakce na oheň B2<sub>ca</sub></i> <i>III – kabel třídy reakce na oheň B2<sub>ca</sub>, s1, d1 v případě instalace v chráněné únikové cestě</i> <i>IV – kabel funkční při požáru</i>				

**Příloha C - Klasifikace kabelů podle jejich reakce na oheň**

Tabulka C-1: Třída reakce elektrických kabelů na oheň [86]

<b>Třída</b>	<b>Kritéria klasifikace</b>
<b>A<sub>ca</sub></b>	Spalné teplo $\leq 2,0$ MJ/kg pozn. pro výrobek jako celek, vyjma kovových materiálů, a pro každou vnější složku výrobku
<b>B1<sub>ca</sub></b>	Šíření plamene (délka porušené plochy) $\leq 1,75$ m Celkové uvolnění tepla od začátku do konce zkoušky $\leq 10$ MJ Max. hodnota míry uvolňování tepla během 30 s $\leq 20$ kW Index rychlosti rozvoje požáru $\leq 120$ W·s <sup>-1</sup> Šíření plamene $\leq 425$ mm
<b>B2<sub>ca</sub></b>	Šíření plamene (délka porušené plochy) $\leq 1,5$ m Celkové uvolnění tepla od začátku do konce zkoušky $\leq 15$ MJ Max. hodnota míry uvolňování tepla během 30 s $\leq 30$ kW Index rychlosti rozvoje požáru $\leq 150$ W·s <sup>-1</sup> Šíření plamene $\leq 425$ mm
<b>C<sub>ca</sub></b>	Šíření plamene (délka porušené plochy) $\leq 2$ m Celkové uvolnění tepla od začátku do konce zkoušky $\leq 30$ MJ Max. hodnota míry uvolňování tepla během 30 s $\leq 60$ kW Index rychlosti rozvoje požáru $\leq 300$ W·s <sup>-1</sup> Šíření plamene $\leq 425$ mm
<b>D<sub>ca</sub></b>	Celkové uvolnění tepla od začátku do konce zkoušky $\leq 70$ MJ Max. hodnota míry uvolňování tepla během 30 s $\leq 400$ kW Index rychlosti rozvoje požáru $\leq 1300$ W·s <sup>-1</sup> Šíření plamene $\leq 425$ mm
<b>E<sub>ca</sub></b>	Šíření plamene $\leq 425$ mm
<b>F<sub>ca</sub></b>	Žádný ukazatel vlastnosti není stanoven

Tabulka C-2: Doplnkové parametry vztahující se k třídám B2<sub>ca</sub> až D<sub>ca</sub> [86]

<b>doplňující značení</b>		<b>Tvorba kouře</b>	
<b>s1</b>		Celkové množství vývinu kouře $\leq 50 \text{ m}^2$ Okamžité množství uvolněného kouře $\leq 0,25 \text{ m}^2/\text{s}$	
<b>s1a</b>		Celkové množství vývinu kouře $\leq 50 \text{ m}^2$ Okamžité množství uvolněného kouře $\leq 0,25 \text{ m}^2/\text{s}$ Součinitel propustnosti $\geq 80 \%$	
<b>s1b</b>		Celkové množství vývinu kouře $\leq 50 \text{ m}^2$ Okamžité množství uvolněného kouře $\leq 0,25 \text{ m}^2/\text{s}$ Součinitel propustnosti $\geq 60 \% < 80 \%$	
<b>s2</b>		Celkové množství vývinu kouře $\leq 400 \text{ m}^2$ Okamžité množství uvolněného kouře $\leq 1,5 \text{ m}^2/\text{s}$	
<b>s3</b>		Žádná uvedená kritéria	
<b>Odkapávání hořících částic</b>			
<b>d0</b>		Žádné planoucí kapky/částice během 20 min zkoušky	
<b>d1</b>		Žádné planoucí kapky/částice trvající déle než 10 s během 20 min zkoušky	
<b>d2</b>		Žádná uvedená kritéria	
<b>Kyselost</b>			
<b>a1</b>		vodivost $< 2,5 \mu\text{S}/\text{mm}$ a $\text{pH} > 4,3$	
<b>a2</b>		vodivost $< 10 \mu\text{S}/\text{mm}$ a $\text{pH} > 4,3$	
<b>a3</b>		Žádná uvedená kritéria	