

# IZKLOP VAROVALKE PRI PODALJŠANI TALILNI FAZI

Martin Bizjak, Mitja Koprivšek, Franc Piki

ETI d. d. Izlake

**Ključne besede:** talilni vložek, talilni element, izklopna karakteristika, napetostna razlika, talilna faza, talilna napetost, prekinitveno mesto talilnega elementa

**Izvleček:** Pri preskusu izklopa varovalke z naznačeno vrednostjo 63 A s tokom 100 A je dopustno trajanje izklopa do 1 ure. V tem času potekata zaporedoma faza segrevanja in talilna faza. Obe se razlikujeta po značilnem časovnem poteku napetosti med priključki talilnega elementa: v prvi fazi narašča napetost počasi in sorazmerno segrevanju talilnega elementa, v drugi pa precej hitreje, ker se začne proces raztapljanja zožitev na segmentu z nanosom spajke. V talilni fazi sproščena toplote znatno segreje cel talilni vložek. Opaženo je bilo, da se lahko včasih talilna faza podaljša tudi na dvojno vrednost, sproščena toplota pa je bila do petkrat večja. Pri pojavu *podaljšan*e talilne faze je segretek površine talilnega vložka presegel temperaturo, ki jo zdrži sam in deli v njegovi bližini. Napetost prekinitve toka, dobljena v *normalni* talilni fazi, je bila okrog 280 mV, v *podaljšani* talilni fazi pa okrog 1100 mV. Ta vrednost je bila dosežena sočasno s stalitvijo prekinitvenih mest na pospajkanem segmentu talilnega elementa in je odvisna od tališča zlitine na teh mestih. Napetost prekinitve toka kaže na kemijsko sestavo taline na prekinitvenem mestu, iz česar je bilo mogoče sklepati na verjeten potek podaljšanja talilne faze. Presoja ugotovitev je bila opravljena tudi s pomočjo rezultatov, ki so bili pridobljeni z drugimi preiskovalnimi metodami.

## Breaking of Fuse Element by Occasionally Prolonged Melting Phase

**Key words:** fuse link, fuse element, breaking characteristics, voltage drop, M-effect, melting voltage, rupture of fuse element

**Abstract:** In the case of fault in power circuit protected by melting fuse the overcurrent should be interrupted by blow of fuse link in the predetermined breaking time. Depending on the magnitude of overcurrent the breaking time can be either as long as up to one hour or of the order of few milliseconds. The relationship breaking time - overcurrent is defined by the breaking characteristics of fuse link of given type and rated current, which follows the rule of inverse proportionality. It should comply to the relevant standards. The breaking process at moderate overcurrent values, which lasts up to approximately 1000 s is dealt with in this paper.

Samples of fuse links of rated current 63 A were tested in laboratory conditions in order to investigate breaking phenomena at constant test current 100 A. Although the test samples passed the requirements of relevant standard a serious overheating was indicated on some of them during break, which was considered hazardous for the device comprising such fuse links due to thermal damage of plastic parts in their vicinity. The majority of tested fuse links exhibited quite moderate temperature rise during break test.

Due to the risk of thermal damage even at the proper breaking function of fuse link the phenomena of the excessive overheating was investigated in particular. At first the statistics of measured results obtained on tested samples was accomplished. Although considerably high scattering of breaking time was indicated, no correlation between the duration of breaking process and the excessive temperature rise was found. In order to find out physical background of these phenomena the voltage drop on the fuse link terminals at the constant test current (of 100 A) was recorded by time for each of test samples. Regarding the obtained results the voltage drop increased at the beginning as semi exponential function according to the physical rules determining the heating of the electric conductor, which was in this case the Cu strip of fuse element. At the end of this phase, which is called "heating-up period", a significantly steeper increase of voltage drop was observed, which indicates changes of material structure on particular interrupting sites, notches, of fuse element, therefore it is called "melting period". The results of the voltage drop obtained on various test samples of the same type, recorded at the moment of break, were concentrated around two significantly different values. As the voltage drop achieved one of these values by levelling it could be attributed to "melting" voltage drop of notches. In the attempt to extract the voltage drop on notches from the voltage drop between fuse terminals, which was the sum of the rest of fuse link drop in series, the best fit approximation of voltage drop in heating-up period was done in order to extrapolate the contribution of the remainder in series and to subtract it from the measured voltage drop in melting period. By this way an improved course of voltage drop on interrupting sites of fuse element was attained. From these results the melting periods of shorter duration and lower level voltage could be clearly distinguished from the longer ones which have significantly higher level voltage. As the course of voltage drop in both cases followed a similar trace, the physical process in melting phase was probably the same regardless to its duration. So the break event can be principally divided into the interruption by *regular* and *prolonged* melting phase. Due to significantly higher value of Joule integral for fuse element in *prolonged* melting phase compared to *regular* one the excessive temperature rise of fuse link can be explained by higher power dissipation at melting of fuse element.

In order to reveal possible phenomena which probably led to the *prolonged* melting period, an examinations of the state of fuse elements after break test were conducted. Each tested fuse link was carefully opened and its blown fuse element withdrawn out of ceramic body and prepared for optical and SE microscopy. Particular attention was pay to the interrupting sites on the fuse element strip. These sites normally appear close to the strip of solder cover, which is placed near a row of notches in order to initiate the interruption of conducting path by dissolving the base strip in melted solder. The major difference between samples, accomplishing break of overcurrent by *regular* and *prolonged* melting phase, was reflected in the area of base Cu strip subjected to the dissolution process. Observations by optical stereomicroscopy clearly showed that at the *regular* type only the row of notches adjacent to the solder strip was exposed to dissolution in melted solder, while at the *prolonged* type the area of dissolution covered significantly larger area along the perforation of fuse element.

The metallographic structure of material on the interrupting sites was characteristic for the CuSn alloy, which was formed in Cu fuse element strip by alloying primarily with Sn of solder cover. Various CuSn metallurgical phases were found by optical metallography, the chemical composition of each particular one was determined by microprobe EDX analyses. With the help of CuSn binary diagram of states the most probable evolution of interruption process during break of overcurrent was assessed. On the other hand it is well known from the physics of electric contacts that the voltage drop on the

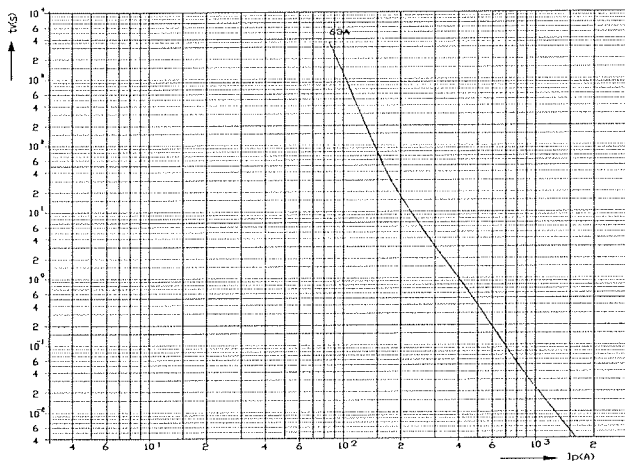
site of current constriction is proportional to the temperature rise on this site. This quantity was also applied as the qualitative indication of temperature on the interrupting sites at moment of break.

In the conclusion, the *regular* melting phase took place at much lower temperature of melting the interruption sites due to the formation of the CuSn alloy with higher content of Sn. At the *prolonged* melting phase the CuSn alloy with higher content of Cu was formed through the dissolution of Cu in solder, which led to higher melting temperature of interrupting sites. The decisive process which led toward the *prolonged* melting phase were proper conditions which enable spreading of liquid solder along the fuse element during interrupting process. If the solder melt remained confined in the narrow area of notches it resulted in the formation of low temperature melting alloy. But when due to certain reasons melted solder was able to spread along the larger area of fuse element, a solid solution with higher melting temperature was formed with regard to the reduced content of Sn in CuSn alloy.

The problem of the detrimental temperature rise of fuse link at break is related to the conditions of the dissolution of Cu fuse strip in solder. In order to avoid the risk of excessive heating of fuse link at break, the propagation of liquid solder over the surface of fuse element strip should be under control. This can be presumably performed by the proper design of fuse element and by select conditions of its manufacturing.

## 1 Uvod

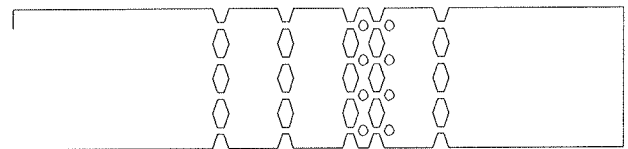
Talilna varovalka varuje tokokrog pred nadtoka, to je toka, ki je večji od nazivnega toka varovalke. Varovalka ima vgrajen talilni vložek s talilnim elementom, ki pri nadtoku prekine tok v času, ki je odvisen od njegove vrednosti. Izklopni čas, ki podaja hitrost reagiranja varovalke pri nadtoku dane vrednosti, je določen z izklopno karakteristiko, ki jo predpisuje standard IEC 60269 /1/. Izklopna karakteristika je funkcijska zveza med izklopnim časom in nadtokom, ki je prikazana grafično je na Sl. 1. Iz nje razberemo, da je izklopni čas varovalke pri večjem nadtoku krajši. Izklopni časi za nadtoke, ki so malo večji od nazivnega toka, so reda velikosti 1000 s, za nadtoke, ki so za faktor 10 ali več večji od te vrednosti, pa so ti časi reda velikosti  $10^{-3}$  s.



Sl. 1: Izklopna karakteristika varovalke D02 gL 63 A

Vsaka varovalka podanega tipa ima za dan nazivni tok svojo standardizirano izklopno karakteristiko. Tej je prilagojena dimenzija in oblika talilnega elementa /2/. Talilni element je funkcionalni del talilne varovalke. Izdelan je iz tankega bakrenega (ali srebrnega) traku, ki je vstavljen v keramično ohišje s priključki in obdan s kremenčevim peskom. Trak je perforiran v obliki segmentov z zoženimi deli (Sl. 2), skozi katere teče električni tok in jih segreva. Na zožitvah enega segmenta je debel nanos spajke, ki je pri nadtoku staljena in raztaplja trak talilnega elementa na prekinitevni mestih, tako da v določenem času prekine zožitve med segmentoma in s tem tudi električni tok. Pojav je poznan kot pregorete varovalke.

Proces izklopa toka s talilnim elementom poteka v splošnem po sledečem zaporedju: segrevanje talilnega elementa na prekinitevni mestih oz. zožitvah perforacije (notches) od delovne temperature do tališča (faza segrevanja) → taljenje prekinitevni mest (talilna faza) → prekinitev kovinske zveze in nastanek izklopnega električnega oblaka → gašenje oblaka in izklop toka (obločna faza). Pri manjših nadtokih in dolgih izklopnih časih reda velikosti 100 s do 1000 s prevladuje izklop s predhodno fazo segrevanja, ki ji sledi prekinitev toka v talilni fazi. Pri velikih nadtokih reda velikosti kratkostičnih tokov pa sta fazi segrevanja in taljenja zelo kratki in jo obravnavamo kot predobločno fazo, ki ji sledi eksplozijska prekinitev zoženih mest, kjer se vzpostavi električni oblak s trajanjem reda velikosti 1 ms, dokler ne ugasne.



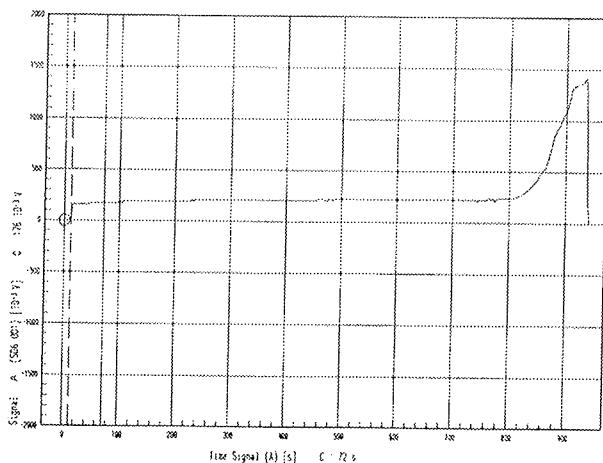
Sl. 2: Talilni element varovalke D02 gL 63 A

Med izklopom se v talilnem elementu razvija toplota, ki jo absorbira kremenčev pesek, od tu pa dalje v keramično telo talilnega vložka ter naprej v ohišje varovalke in v okolico. Pri kratkih izklopnih časih poteka segrevanje skoraj adiabatsno, pri dolgih pa je proces kvazistacionaren, kjer se toplota prevaja od talilnega elementa skozi kremenčev pesek na telo talilnega vložka, z njegove površine pa v okolico. Keramično telo vložka se lahko v časih segreje celo do rdečega žara. Zaradi vse pogostejše uporabe plastičnih materialov za ohišja naprav z varovalkami, ki nadomeščajo toplotno odpornejšo keramiko, je priporočljivo privzeti mere, s katerimi omejimo segrete talilnega vložka, ker sicer lahko poškoduje okoliške dele iz plastike.

Pri izklopu s prevladujočo talilno fazo plast posebne spajke, ki je nanosena na izbrani predel perforacije talilnega elementa, omogoča prekinitev s stalitvijo kovinske zveze pri temperaturi, ki je manjša od tališča osnovnega materiala traku, iz katerega je izdelan talilni element. Pri nadtoku se na prekinitevni mestih spajka segreje do njenega tališča, zaradi česar začne raztapljati material talilnega elementa na prekinitevni mestih, dokler ne nastanejo tekoči mostiči, na katerih se tokokrog prekine. Proces raztapljanja določa trajanje izklopa.

## 2. Raziskava časovnega poteka izklopa varovalke v talilni fazi

Izklop varovalke s talilno fazo je bil raziskan v talilnem vložku tipa gL za nazivni tok 63 A pri konstantnem enosmernem preskusnem toku 100 A, kar znaša 1,6-kratnik nazivnega toka. V skladu z predpisano izklopno karakteristiko mora biti izklop toka opravljen manj kot 3600 s. Testni talilni vložek je bil za preskus vstavljen v standardno podnožje varovalke gL 63 A s priključki. Računalniško krmiljen laboratorijski vir preskusnega toka z napetostjo med odprtima sponkama 30 V /3/ je dovajal stabiliziran enosmerni tok na sponke testnega podnožja. Meritev in zapis časovnega poteka napetosti med priključki varovalčnega podnožja je opravljal merilni modul, ki je sestavni del računalniškega krmilnega modula laboratorijskega tokovnega vira. Vgrajena zaščita merilnega modula pred prenapetostjo odprtih sponk zagotavlja hitri izklop toka pri prekinitvi talilnega elementa in drugih nenadnih spremembah napetosti na merilniku. Merilni rezultati so bili shranjeni v pomnilniku krmilnega računalnika za nadaljnjo analizo kot množica parov (napetostna razlika na priključkih, čas tokovne obremenitve) s širimo razreda za napetosti 16 mV in s širino razreda za čas 1 s. Mogoč je tudi neposreden grafični prikaz izmerjenega poteka izklopa, ki je kot primer izklopa s talilnim vložkom prikazan na Sl. 3.



Sl. 3: Časovni potek izklopa talilnega vložka s talilno fazo pri izklopnem preskusu

Kot je videti iz poteka izklopa na Sl. 3, napetost med priključki po vključitvi preskusnega toka narašča semi-eksponentno zaradi segrevanja talilnega elementa. Njegova električna upornost narašča zaradi temperaturnega koeficienta električne upornosti materiala, uporabljenega za talilni element, sorazmerno temperaturi. Na koncu faze segrevanja začne napetost strmo naraščati in bi pri prekinitvi toka skokovito narasla na napetost odprtih sponk tokovnega vira, če ne bi zaščitni modul tokovnega vira sprožil hitri izklop toka in zmanjšal napetost vira na ničlo.

Pri raziskavi talilne faze je bil na vsakem preskusnem talilnem vložku izmerjen celoten časovni potek napetosti med

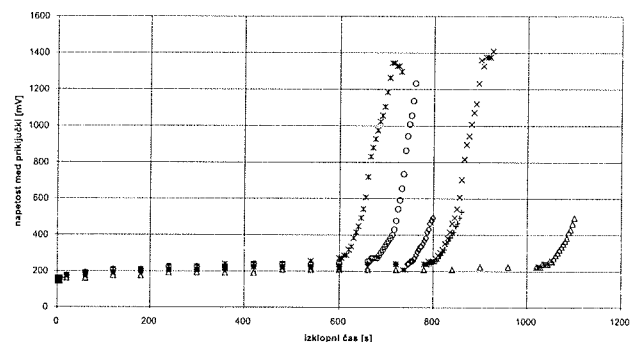
priključki. Za nadaljnjo analizo je bil uporabljen fizikalni model segrevanja talilnega vložka in s tem je bila po metodi najboljšega približka opravljena ocena vplivnih parametrov in korelacije z časom trajanja talilne faze.

Električnim meritvam je sledila preiskava stanja talilnega elementa po opravljenem izklopu. Vsak talilni vložek je bil po preskusu previdno odprt, tako da smo iztresli iz keramičnega telesa najprej kremenčev pesek, potem pa izvlekli iz njega še talilni element, ki zaradi tega posega ni smel biti poškodovan. Na prekinitvenih mestih so bila na traku vtaljena zrna kremenčevega peska, katera so bila deloma odstranjena, da je bilo mogoče izvesti mikroskopsko preiskavo prekinitve na perforaciji traku zaradi izklopa toka.

Rezultati električnih meritev in mikroskopskih preiskav pregorelega talilnega elementa naj bi omogočili razpoznati procese v talilnem elementu med potekom izklopa in pojasniti vzrok za podaljšanje talilne faze.

## 3. Analiza merskih rezultatov izklopa s talilno fazo in diskusija

Rezultati preskusov izklopa varovalke so za nadaljnjo računalniško analizo prirejeni v obliki, kot jo prikazuje graf na Sl. 4. Na njem so zbrani rezultati časovnega poteka napetosti na priključkih varovalke med izklopom za več talilnih vložkov istega tipa. V trenutku  $t = 0$  je bil vključen preskusni tok, izmerjena napetost približno 150 mV pa je razlika med priključki v začetnem hladnem stanju. S trajanjem tokovne obremenitve napetost zaradi segrevanja talilnega elementa v vložku počasi narašča, dokler po kakih 500 do 1000 s hitro naraste od kakih 300 mV preko 500 mV celo do 1400 mV. Tam napetost v hipu pade pod 100 mV zaradi delovanja zaščite merilnega modula, dejansko pa skoči na napetost vira 30 V, ker pride do prekinitve preskusnega toka oz. izklopa. Izklopni čas pri nastavljenem preskusnem toku je trajanje tokovne obremenitve od vključitve toka do prekinitve in je za preskušance, katerih rezultate kaže graf na Sl. 4, v razponu od 700 s do 1100 s, kar ustreza zahtevam glede na izklopno karakteristiko.



Sl. 4: Prikaz rezultatov izklopa za preskusne talilne vložke, uporabljenih za nadaljnjo analizo

Začetni dolgotrajnejši časovni interval s počasnim naraščanjem napetosti med priključki  $U(t)$  pripada fazi segrevanja,

kateri sledi precej krajša *talilna faza* s hitrim naraščanjem  $U(t)$  preko 400 mV, ki se konča s prekinitvijo toka pri  $t = t_{izk}$  pri neki največji izmerjeni napetosti  $U(t_{izk}) = U_p$ . Na prikazanem grafu lahko vidimo dva načina izklopa: *prvega* s kratkotrajno talilno fazo in majhno napetostjo prekinitve toka  $U_p \approx 500$  mV, *drugega* pa z daljšo talilno fazo in precej večjo napetostjo prekinitve toka  $U_p \approx 1400$  mV. V *prvem* načinu izklopa je talilna faza *normalna*, talilni vložek segreje do največ  $300^\circ\text{C}$ , kar pomeni nevarnosti za poškodbe sosednjih delov tokokroga, zato je tak časovni potek izklopa varovalnega elementa tokokroga *normalen*. Včasih se zgodi tudi *drugi* način izklopa s *podaljšano* talilno fazo. Z izračunom jouskega integrala izklopa je bilo ocenjeno, da se v podaljšani talilni fazi sprosti vsaj petkrat več toplote, kot v normalni. Ker se toliko toplote razvije v času, krajšem od  $0,2 \tau$ , kjer je  $\tau$  termična časovna konstanta varovalke se keramično telo vložka na površini segreje lahko za več kot  $600^\circ\text{C}$  (temperatura rdečega žara!). Zato naj bi analiza rezultatov preskusov predvsem omogočila dognati, kaj je odločilno za nastop podaljšane talilne faze in v skladu s tem, če ima vpliv na trajanje talilne faze tudi predhodna faza segrevanja.

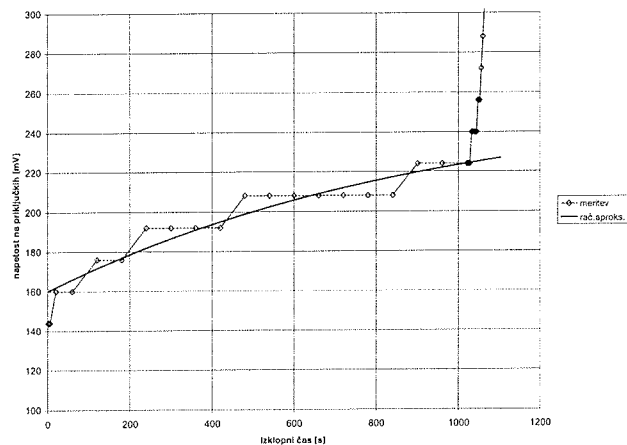
### 3.1. Analiza poteka faze segrevanja

Potek  $U(t)$  v fazi segrevanja je značilen za procese segrevanja vodnika s tokom. S fizikalnim modelom vodnika enostavne geometrije dobimo aproksimativen časovni potek  $U_{apr}(t)$  za fazo segrevanja v obliki:

$$U_{apr}(t) = U_0 + B \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right] \quad (1)$$

s katerim po metodi najboljšega približka iz merskih rezultatov  $U(t)$  določimo koeficiente  $U_0$ ,  $B$  in  $\tau$  kot parametre, ki so značilni za vsak posamezen preskušaneec. V začetku tokovne obremenitve ( $t < 10$  s) se  $U_{apr}(t)$  ne prilega najbolje  $U(t)$ , ker v aproksimativnem modelu obstaja le termična časovna konstanta celotne varovalke, pojavi hitrejšega segrevanja delov perforacije pa so zanemarljivi. Zato se aproksimacija prilega meritvi šele po času, primerljivem s časovno konstanto  $\tau$  varovalke. Prileganje je prikazano na grafu Sl. 5, iz katerega lahko ocenimo tudi natančnost merskih rezultatov.

Natančnost ocene parametrov  $U_0$ ,  $B$  in  $\tau$  očitno ni odvisna le od natančnosti aproksimacijskega modela, ampak v fazi segrevanja tudi od širine razreda, s katero pomnilnik merilnega modula zajema merske rezultate. Ta je v redu velikosti spremembe merjene količine, zato je ocena koeficientov aproksimacijske funkcije premalo natančna, da bi lahko iz njihove deviacije za vsak posamezen preskušaneec lahko sklepali na vplive, ki vodijo v podaljšano talilno fazo. Dovolj zanesljiva je le korelacija med koeficientom  $U_0$  in časom trajanja faze segrevanja, oz. časom prehoda v talilno fazo. Hitrost segrevanja talilnega elementa je odvisna od njegove začetne upornosti, od tega pa je odvisen tudi čas, ko se prekinitvena mesta na njem segrejejo do tališča spajke. Iz rezultatov grafa Sl. 4 pa je mogoče sklepati, da trajanje



Sl. 5: Funkcija najboljšega prileganja za rezultate faze segrevanja

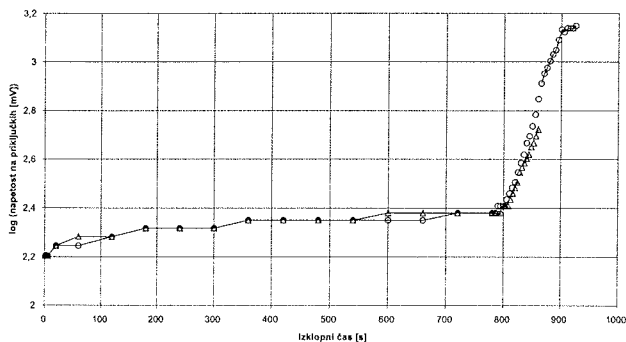
faze segrevanja ni v povezavi z nastopom podaljšane talilne faze.

Numerična simulacija segrevanja talilnega elementa je pokazala, da upornost priključnih elementov med dovodnim vodnikom in samim talilnim elementom bistveno vpliva na merilne rezultate in da je deviacija te vrednosti po posameznih preskušanecih nezanemarljiva, zato ta lahko prekriva vpliv osnovnih parametrov talilnega elementa na potek izklopa v fazi segrevanja. Zato se vpliva faze segrevanja na nastop podaljšane talilne faze ne da ugotoviti dovolj zanesljivo.

### 3.2. Analiza poteka talilne faze

Časovni potek napetosti med priključki  $U(t)$  preskušaneega talilnega vložka se v talilni fazi ne da simulirati na osnovi enostavnega fizikalnega modela, kot v fazi segrevanja, ker v njej potekajo kompleksni procesi topljenja perforiranih delov talilnega elementa v spajki in spremembe kemijske sestave teh segmentov. Potek teh procesov lahko vodi v *normalno* ali v *podaljšano* talilno fazo. Nastanek ene ali druge vrste talilne faze ne korelira niti z začetno upornostjo talilnega elementa, niti s trajanjem faze, kot sledi kvalitativno tudi iz medsebojne primerjave grafov  $U(t)$  za posamezne talilne vložke na Sl. 4. Na grafu Sl. 6 lahko primerjamo rezultate dveh preskušancev, katerih izmerjeni potek  $U(t)$  je skoraj identičen v času trajanja tokovne obremenitve skoraj do izklopa, vendar je eden izklopil z *normalno* in drugi s *podaljšano* talilno fazo.

Zaradi raziskave poteka procesa raztapljanja perforiranega segmenta talilnega elementa v spajki bi bil v talilni fazi relevanten podatek napetost na perforiranem segmentu s plastjo staljene spajke. Ker neposredni dostop z merilnimi sondami do tega mesta ni mogoč, je bil ta podatek pridobljen iz meritev posredno: če od izmerjene  $U(t)$  odštejemo v skladu z (2) aproksimacijsko funkcijo faze segrevanja  $U_{apr}(t)$  po vsem časovnem intervalu tokovne obremenitve, s tem računsko eliminiramo prispevek ostalih delov talilnega elementa in dobimo z dosegljivo natančnosti potek napetosti na talečih se segmentih,  $U_M(t)$ :



Sl. 6: Primer skoraj identičnega poteka izklopa za preskušanca z normalno in podaljšano talilno fazo

$$U_M(t) = U(t) - U_{apr}(t) \quad (2)$$

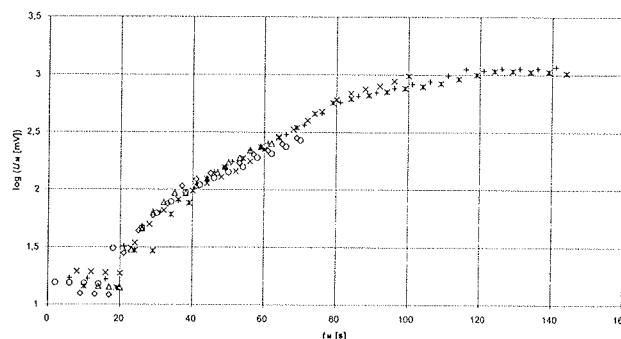
S prej utemeljenim privzetkom, da procesi faze segrevanja ne določajo poteka procesov talilne faze, lahko merske rezultate  $U_M(t)$  za talilno fazo vsakega posameznega preskušanca premaknemo v isto časovno izhodišče in jih na tak način napravimo medsebojno primerljive. Tako je talilna faza opisana s potekom napetosti  $U_M(t_M)$  za  $t_M < 0$  od trenutka nastopa te faze pri  $t_M = 0$ , kjer je  $U_M(t_M) = 0$ . Tako obdelani merski rezultati za posamezne preskušance so skupaj grafično prikazani na Sl. 7, rezultati preskušancev z normalno talilno fazo so predstavljeni s simboli  $\diamond$ ,  $\Delta$  in  $O$ , rezultati za podaljšano talilno fazo pa s simboli  $+$ ,  $x$  in  $*$ .

Kot je razvidno iz grafa, se rezultati  $U_M(t_M)$  za preskušance z istovrstno talilno fazo precej dobro skladajo med seboj. Rezultati za normalno talilno fazo so nekoliko manjši od rezultatov za podaljšano talilno fazo, vendar so tudi rezultati obeh vrst talilne faze kvalitativno toliko skladni med seboj, da lahko predpostavljamo enak potek fizikalnih pojavov v talilni fazi v večjem delu časovnega intervala, ki je skupen obema vrstama talilne faze. Šele malo pred izklopom z normalno talilno fazo se pojavi opaznejše razhajanje rezultatov, ki spelje dogajanje v podaljšano talilno fazo. Potek talilne faze torej lahko preusmerijo že sorazmerno majhni učinki, ki jih je težko nadzorovati.

### 3.3. Talilna napetost

Električna napetost med dvema točkama na vodniku s tokom, ki odvaja toploto le s prevajanjem po njem, je odvisna le od temperature na odseku med tema dvema točkama in od snovnih parametrov vodnika /4/. V fazi segrevanja je potek  $U(t)$  odražal le spremembo temperature talilnega elementa, na potek  $U_M(t_M)$  v talilni fazi pa dodatno vplivajo še snovne spremembe na prekinitvenem segmentu. Zato  $U_M(t_M)$  ne moremo matematično podati z enostavno analitično funkcijo. Vendar ima v trenutku izklopa ( $t_M = t_{M,izk}$ ) za posamezne preskušance  $U_M(t_{M,izk})$  neko značilno vrednost, ki je odvisna od vrste talilne faze, za normalno 250 ÷ 280 mV in za podaljšano 1000 ÷ 1100 mV. Kvalitativno ima ta količina značilnosti spremembe agregatnega stanja. Za nekatere kovine je podana v [V] talilna napetost /4/, ki ustreza temperaturi tališča.

Vrednost 250 ÷ 280 mV oz. 1000 ÷ 1100 mV lahko privzamemo kot napetost stalitve perforiranih mest na talilnem elementu, ki prekine električni tok. Nobeno od teh vrednosti se kvantitativno ne da uskladiti s podatki v literaturi, npr. v /4/, ker navedene vrednosti veljajo za segrevanje stičnega mesta na električnih kontaktih, kjer dejanske razmere ustrezajo teoretičnim izhodiščem. V literaturi so podane predvsem vrednosti za čiste kovine in enostavne zlitine, za zlitine v splošnem pa so podatki nezanesljivi. Na grafu Sl. 7 lahko zlasti za časovni potek  $U_M(t_M)$  na preskušancih s podaljšano talilno fazo tik pred izklopom, to je pri  $t_M \rightarrow t_{M,izk}$ , opazimo približevanje konstantni vrednosti, kar res ustreza poteku temperature pri spremembi agregatnega stanja, kot je npr. prehod trdno  $\rightarrow$  tekoče. Pri normalni talilni fazi se na samem poteku  $U_M(t_M)$  tega prehoda ne opazi, ker se prekinitveni segment pri izklopom na zelo omejenem območju. Iz prekinitvene napetosti  $U_M(t_{M,izk})$  za obe vrsti talilne faze se da vsaj kvantitativno zanesljivo oceniti, da je temperatura prekinitvenega mesta v trenutku izklopa pri normalni talilni fazi precej manjša, kot pri podaljšani. V podaljšani talilni fazi je temperatura precej večja, taljenje zajame precejšen del talilnega elementa, kar nakazuje tudi potek  $U_M(t_M)$  pred prekinitvijo toka.



Sl. 7: Potek talilne napetosti  $U_M(t_M)$  za preskušance z normalno in podaljšano talilno fazo

Metalogrfska analiza, ki je bila opravljena na vseh preskušancih po opravljenem preskusu izklopa toka, je pokazala značilne razlike med predstavniki normalne in podaljšane talilne faze v končnem stanju talilnega elementa. Na talilnem elementu z normalno talilno fazo lahko razločimo nastanek zlitine med spajko in osnovnim materialom, ki je ostro omejena okoli prekinitvenih mest le na enem segmentu perforacije, ter vsebuje metalurške faze z nižjim tališčem /5/. Na talilnem elementu s podaljšano talilno fazo je nastala zlitina na prekinitvenih mestih preko več zaporednih segmentov talilnega elementa. Tališče metalurških faz te zlitine je veliko in je blizu tališča osnovnega materiala talilnega elementa /5/.

### 4. Sklep

Pri izklopom toka s talilno varovalko se v podaljšani talilni fazi izklopa sprosti do petkrat več toplote, kot v normalni. Večina sproščene toplote se porabi za segrevanje talilnega vložka, zato se ta segreje do temperature, ki lahko preseže

termično odpornost varovalke in materialov v njeni okolici, zato je treba odpraviti vzroke za pojav podaljšanja talilne faze. Trajanje talilne faze je odvisno od poteka raztapljanja talilnega elementa v spajki na prekinitvenih mestih. Če na teh mestih nastane zlitina z veliko vsebnostjo komponent iz spajke, ki ima majhno temperaturo tališča, je talilna faza krajša oz. *normalna*. Taljenje zajame ozko omejeno območje na prekinitvenih mestih enega segmenta. Talilna faza se podaljša, kadar se spajka razlije po širšem področju talilnega elementa, ne da bi se izvedla prekinitvev. Koncentracija komponent iz spajke je v nastali zlitini z osnovnim materialom talilnega elementa manjša in temperatura tališča večja. To temperaturo doseže talilni element kasneje, zato se talilna faza podaljša.

Iz predhodnih rezultatov meritev električnih količin ni mogoče vnaprej razpoznati in izločiti talilnih vložkov, ki bodo izklopili s podaljšano talilno fazo. Trajanje talilne faze je odvisno od lege nanosa spajke na perforiranih segmentih in od količine nanosene spajke. Verjetnost, da bo talilna faza podaljšana, je odvisna od tehnološko dosegljivih toleranc pri nanašanju plasti spajke v proizvodnji varovalk.

Rezultati raziskave so podali izhodišče za konstrukcijo talilnega elementa varovalk iz serijske proizvodnje, za katere je verjetnost podaljšanja talilne faze zanemarljiva.

## 5. Literatura

- /1/ IEC 60269-1 (1998-12), IEC 60269-3-1 (2001-06)
- /2/ H. Johann: Elektrische Schmelzsicherungen für Niederspannung, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1982
- /3/ Navodilo za uporabo tokovnega generatorja v Laboratoriju ETI
- /4/ P. G. Slade: Electrical Contacts, Marcel Dekker, 1999
- /5/ C. J. Smithells: Metals Reference Book, Volume II, Butterworths, 1967

*Dr. Martin Bizjak, univ. dipl. ing. fiz*  
*Sv. Duh 275, 4220 Škofja Loka*  
*E-pošta: bizjakm@email.si*  
*tel.: +386 4 5131 521*

*Mitja Koprivšek, univ. dipl. ing. el*  
*ETI d. d. Izlake, Obrezija 5, 1411 Izlake*  
*E-pošta: mitja.koprivsek@eti.si*  
*tel: +386 3 5657 450, fax: +386 3 5674 077*

*Franc Pikel, ing. el*  
*ETI d. d. Izlake, Obrezija 5, 1411 Izlake*  
*E-pošta: franc.pikel@eti.si*  
*tel: +386 3 5657 460, fax: +368 3 5674 077*

*Prispelo (Arrived): 08.01.2003 Sprejeto (Accepted): 26.08.2003*