

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ

Неџад Хаџиефендић

**УТИЦАЈ ЛОШИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ
КОНТАКАТА НА НАСТАНАК
ПОЧЕТНОГ ПОЖАРА И МЕТОДА ЗА
ЊИХОВО ОТКРИВАЊЕ У
НИСКОНАПОНСКИМ
ЕЛЕКТРИЧНИМ ИНСТАЛАЦИЈАМА**

докторска дисертација

Београд, 2019.

UNIVERSITY OF BELGRADE
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING

Nedžad Hadziefendić

**THE INFLUENCE OF POOR
ELECTRICAL CONTACTS ON THE
OCCURRENCE OF INITIAL FIRE AND
A METHOD FOR THEIR DETECTION
IN LOW-VOLTAGE ELECTRICAL
INSTALLATIONS**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2019

Ментор:

др Миомир Костић, редовни професор,
Универзитет у Београду, Електротехнички факултет

Чланови комисије:

др Зоран Радаковић, редовни професор,
Универзитет у Београду, Електротехнички факултет

др Драгана Ђорђевић, научни саветник,
Универзитет у Београду, Институт за хемију, технологију и металургију

др Јован Цветић, редовни професор,
Универзитет у Београду, Електротехнички факултет

др Јован Трифуновић, доцент,
Универзитет у Београду, Електротехнички факултет

Датум одбране: _____

ЗАХВАЛНИЦА

Посебно се захваљујем **ментору, проф. др Миомиру Костићу**, на одлучујућој подршци и несебичној помоћи, као и на усмеравањима и подстицајима, током свих година заједничког рада, а нарочито за време израде докторске дисертације у свим њеним фазама. Његова запажања су била драгоцене, а коментари и сугестије су значајно допринели побољшању квалитета рада. Професору Костићу дугујем велику захвалност што ме је научио да пишем научно-стручне радове.

Захваљујем се **колеги доц. др Јовану Трифуновићу** на спремности да помогне, пре свега корисним сугестијама и саветима у експерименталном раду за време израде докторске дисертације. Такође, захваљујем му се на великом ангажовању и стручној помоћи приликом писања научно-стручних радова из области докторске дисертације.

Користим прилику да се захвалим **колегиници др Драгани Ђорђевић**, научном саветнику на Институту за хемију, технологију и металургију, која ми је омогућила припрему експеримената за последњу фазу израде докторске дисертације.

Хвала и свим осталим члановима комисије на прегледу ове дисертације.

Такође, захваљујем се **колеги Браниславу Јурановићу**, који ми је омогућио да прву фазу дисертације са најбројнијим експериментима изведем на специјалној апаратури коју је он конструисао.

Хвала и **господину Славку Чупићу**, вишем ватрогасном официру прве класе, који ми је 2006. године, а и касније, значајно помогао да почнем професионално да се бавим облашћу превентивне заштите од пожара.

Проф. др Лидији Ђокић, редовном професору на Архитектонском факултету, и **колеги Марку Давидовићу**, докторанду на Електротехничком факултету, захваљујем се на драгоцену стручно-техничку помоћ приликом припреме научно-стручних радова из области докторске дисертације, а који су објављени у еминентном научном часопису са импакт фактором.

Захваљујем се својим родитељима, **мајци Андријани и оцу Асиму, као и брату Дамиру са породицом**, на љубави, храбрењу и подршци да се посветим докторату, да будем довољно јак и да никада не одустанем. Велико хвала **супрузи Ани** на разумевању, посвећености и љубави за време које сам провео на изради докторске дисертације.

Београд, 2019.

Неџад Хаџиефендић

Наслов докторске дисертације:

Утицај лоших електричних контаката на настанак почетног пожара и метода за њихово откривање у нисконапонским електричним инсталацијама

РЕЗИМЕ

Поуздано функционисање нисконапонских електричних инсталација представља важан предуслов за нормално одвијање технолошких процеса у индустрији, нормалан рад јавних установа (школа, позоришта, музеја, болница...), неометано функционисање домаћинства итд. Услед лошег избора или неадекватне уградње, коришћења или одржавања електричних инсталација, јављају се кварови који могу да доведу до пожара, електричног удара или прекида у напајању (дела) објекта електричном енергијом. Посебна пажња мора да се посвети кваровима који могу да изазову пожар, а које класичне заштитне компоненте (аутоматски прекидач, осигурач са топлјивим уметком, заштитни уређај диференцијалне струје итд.) не могу да детектују. Такве кварове најчешће изазивају лоши електрични контакти.

Лош електрични контакт у нисконапонској електричној инсталацији може се појавити у разводном орману (разводној табли), али и било где у струјном колу (на оштећеном проводнику, у утикачу или утичници, у продужном каблу, на пријемнику електричне енергије итд.). Уколико се не отклони, временом се повећава његова температура, што може довести до топљења или паљења изолације електричне компоненте и околног запаљивог материјала. Лошим електричним контактом у електричној инсталацији може се назвати онај контакт код кога је:

- смањена сила притиска налегања контактних површина бакарног проводника и завртња на прикључном елементу електроинсталационе компоненте (редукција момента затезања),
- остварено непотпуно налегања (преклапање) површине бакарног проводника и контактне површине на прикључном елементу електроинсталационе компоненте (смањење ефективне површине контакта), или
- повећан слој оксида на месту електричног контакта (стар и/или корозијом оштећен контакт).

Нити домаћи нити међународни правилници и стандарди којима су прописане периодичне верификације квалитета нисконапонских електричних инсталација не садрже процедуре помоћу којих би се у раној фази детектовао лош електрични контакт. Међутим, једна од техника које се данас користе у ту сврху је вршење превентивних термовизијских прегледа (само у САД постоји стандард који покрива ову област). Оваквим прегледом могу једноставно и ефикасно да се открију лоши електрични контакти на којима су створени предуслови за настанак почетног пожара на нисконапонској електричној инсталацији. Детектовани кварови и нерегуларности најчешће се могу отклонити једноставним интервенцијама електричара или техничких служби корисника објекта. Главни недостатак поменуте технике термовизијског прегледа је немогућност да се прегледају (сниме) електрични контакти који нису директно (визуелно) доступни инфрацрвеном сензору камере.

Циљ докторске дисертације је анализа утицаја лоших електричних контаката на настанак почетног пожара и развој методе за њихово рано откривање у нисконапонским електричним инсталацијама. На основу великог броја извршених експеримената у којима су коришћене разне комбинације материјала од којих се израђују контакти (бакар–бакар, бакар–месинг и бакар–нерђајући челик), уз помоћ посебно конструисане апаратуре симулиран је лош електрични контакт који настаје услед непотпуног налегања (преклапања) бакарног проводника и површине електроинсталационог елемента на прикључку електроинсталационе компоненте. Утврђено је да бакар–нерђајући челик представља критичну комбинацију материјала за које контакт при истим условима (истом струјном оптерећењу, пресеку проводника и степену погоршања контакта у смислу истог процентуалног смањења ефективне површине преклапања) најбрже достиже максималну трајно дозвољену температуру. На основу великог броја експеримената утврђен је и утицај редукције момента затезања завртња у електроинсталационој компоненти на настајање „вреле“ тачке у шуко-утикачима и шуко-утичницама. Закључено је да су за настанак „вреле“ тачке неповољнији лоши електрични контакти настали у уграђеној електричној инсталацији објекта (где је уобичајен бакарни проводник пуног пресека) у односу

на лоше електричне контакте настале у напојним кабловима пријемника (где се уобичајено користи лицнасти бакарни проводник).

На основу великог броја изведених експеримената у којима је анализиран утицај лоших електричних контаката на настанак „врелих“ тачака на шукоутичницама, као и на основу података добијених из великог броја стручних налаза о верификацији квалитета нисконапонских електричних инсталација у индустријским и административним објектима (које је израдила Лабораторија за испитивање нисконапонских електричних и громобранских заштитних инсталација Електротехничког факултета у Београду), развијена је нова метода за откривање лоших електричних контаката. Она је заснована на успостављању корелације између измерених отпорности петље квара и петље кратког споја и степена погоршања контакта, односно повећања његове електричне отпорности. Урађен је низ експеримената са утичницом која је била коришћена дуги низ година (30 година у анализираном случају), као и низ експеримената са новим утичницама, али са електричним контактима који су претходно били намерно изложени корозији. Да би се убрзао процес корозије, у једној од нових утичница прикључак фазног проводника је третиран царском водом (концентрована HNO_3 : концентрована $\text{HCl} = 1:3$ (v / v)), а у другој новој утичници прикључак неутралног проводника третиран је концентрованом сумпорном киселином (H_2SO_4). Коришћењем ових хемикалија симулиран је ефекат дуготрајног излагања електричних контаката електроинсталационих компоненти киселој атмосфери. Упоредивањем резултата мерења која су за циљ имала да се анализирају ефекти редукције момента затезања завртња на прикључцима тестираних утичница ((старе (коришћене) утичнице и две нове утичнице (са намерно кородираним спојевима)) на загревање и електричну отпорност контакта, показано је да оне имају сличне карактеристике.

У доступним домаћим и страним стандардима и научностручној литератури, уз изузетак неколико патената који су намењени за индустријске и специјалне примене, нису представљене методе које могу да послуже за правовремено откривање лоших електричних контаката у стамбеним, пословним и јавним објектима. Применом методе развијене у предметној дисертацији, која је намењена откривању лоших електричних контаката у струјним колима,

редуковала би се вероватноћа настајања лоших електричних контаката и опасних „врелих“ тачака на њима које изазивају пожар (метода би се примењивала у оквиру редовне процедуре за проверу ефикасности система заштите заснованог на аутоматском искључењу напајања у случају квара – електричним мерењем отпорности петље квара и отпорности петље кратког споја). Тиме би се решио проблем немогућности да се термовизијским прегледом открију „вреле“ тачке на лошим контактима са којима сензор камере нема директан визуелни контакт. Предложена метода за откривање лошег електричног контакта примењена је приликом верификације квалитета нисконапонских електричних инсталација у стамбеним јединицама различите старости (10-60 година). Проверена је и могућност успостављања везе између старости стамбених јединица (тачније старости њихових електричних инсталација) и вероватноће настанка опасне „вреле“ тачке на лошем електричном контакту у струјним колима монофазних и трофазних пријемника. Нажалост, никаква веза није успостављена. За њено евентуално успостављање било би неопходно применити нову методу на више хиљада утичница у становима широког опсега старости.

Неоткривен лош електрични контакт у електричној инсталацији може да проузрокује редни електрични лук који је чест узрок пожара. За разлику од лошег електричног контакта, редни електрични лук може бити откривен применом савремених заштитних компоненти. У лабораторијским условима, експериментално је извршена провера функционалности рада *AFDD (Arc-Fault Detection Device)* компоненте намењене европском тржишту, чија је основна намена заштита од нежељеног редног електричног лука. Провера функционалности је почивала на великом броју лабораторијских експеримената помоћу којих су симулиране скоро све релевантне ситуације успостављања редног електричног лука, и то за различите комбинације материјала електрода (бакар–бакар и бакар–месинг). Регистровано је правовремено реаговање *AFDD* компоненте у сваком од тих случајева. Такође, реализовани су експерименти помоћу којих је констатовано да *AFDD* компонента није реаговала при нормалном раду нелинеарних пријемника који садрже енергетску електронику (нпр. персонални рачунар, штампач, микроталасна пећница, клима-уређај итд.), као и при нормалном раду пријемника који садрже колекторске моторе (нпр. усисивач,

бушилица, фен итд.), иако је за њихов рад нормално постојање електричних лукова. На основу резултата тих експеримената израђена је препорука за инсталирање *AFDD* компоненте у објектима у којима се окупља велики број људи, односно дато је мишљење о адекватности њене употребе у Републици Србији.

Кључне речи: лош електрични контакт, преклапање елемената контакта, момент затезања контакта, „врела“ тачка, пожар, термовизија, редни електрични лук, контактна електрична отпорност, периодична верификација нисконапонских електричних инсталација

Научна област: Електротехника

Ужа научна област: Електроенергетика

УДК број: 621.3

The title of doctoral dissertation:

The influence of poor electrical contacts on the occurrence of initial fire and a method for their detection in low-voltage electrical installations

ABSTRACT

Reliable functioning of low-voltage electrical installations represents an important prerequisite for normal functioning of technological processes in the industry, normal operation of public institutions (schools, theaters, museums, hospitals,...), proper operation of households, etc. Due to poor selection or inadequate installation, improper use or maintenance of electrical installations, failures can occur causing fire, electric shock or interruption in power supply of a facility (or its part). Special attention must be given to fire-causing failures, which cannot be detected by conventional protecting devices (such as: miniature circuit breakers, fuse-links, residual current devices, etc.). Such failures are most often caused by poor electrical contacts.

Poor electrical contacts in low-voltage electrical installations can occur in the distribution cabinet (switchboard) or anywhere in the electrical circuit (on damaged conductors, in plugs or receptacles, in extension cords, in electrical loads, etc.). If such a failure is not resolved, the temperature of the poor contact increases gradually, which can lead to melting or ignition of the insulation of an electrical component and the surrounding flammable material. In an electrical installation, a poor electrical contact can be considered as characterized by:

- a reduced pressure force between the contact surfaces of the copper conductor and the screw of the electrical component terminal (reduction of the torque),
- an incomplete overlap of the surface of the copper conductor and the contact surface at the electrical component terminal (reduction of the contact surface), or
- an increased oxide layer at the point of electrical contact (old and/or corrosion-damaged contact).

Neither local nor international regulations and standards, which define periodic verification of the quality of low-voltage electrical installations, contain procedures by which a poor electrical contact would be detected at an early stage. However, one of the techniques used for this purpose today is performing preventive thermographic inspections (a standard covering this area is available only in the USA). By such inspections a poor electrical contact which creates prerequisites for the occurrence of an

initial fire in a low-voltage electrical installation can easily and effectively be detected. Detected failures and irregularities can most frequently be eliminated by simple interventions of electricians or facility technical services. The main disadvantage of the thermographic inspection is the inability to inspect electrical contacts which are not directly (visually) accessible to the camera sensor.

The aim of the doctoral dissertation is the analysis of the impact of poor electrical contacts on the occurrence of an initial fire and the development of a method for their early detection in low-voltage electrical installations. Based on a large number of experiments carried out with various combinations of materials from which contacts are made (copper–copper, copper–brass and copper–stainless steel), by a specially designed apparatus a poor electrical contact occurrence due to an incomplete overlap of a copper conductor and a corresponding element of an electrical device was simulated. It was concluded that copper–stainless steel represents a critical combination of materials for which a contact most rapidly reaches the maximum permissible temperature under the same conditions (the same load, conductor cross-section and contact deterioration degree in terms of the same percentage reduction of the overlap surface). Based on a large number of experiments, the impact of the reduction of the torque of tightening of the screw in the electrical component on the occurrence of a „hot“ spot in plugs and receptacles was also determined. It was concluded that poor electrical contacts developed in built-in electrical installations of buildings (where the copper conductor of the full cross-section is common) are more unfavourable for the occurrence of a „hot“ spot compared to poor electrical contacts developed in power cables of electric loads (where the stranded copper conductor is commonly used).

Based on a large number of experiments in which the impact of poor electrical contacts on the occurrence of „hot“ spots in receptacles was analysed, as well as on the data obtained from a large number of documents related to periodic verifications of the quality of low-voltage electrical installations in industrial and administrative facilities (issued by the Laboratory for testing low-voltage electrical and lightning protection installations at the Faculty of Electrical Engineering in Belgrade), a new method for detecting poor electrical contacts has been developed. It was based on the establishment of a correlation between the measured line to earth and line to neutral short circuit loop resistances and the degree of the contact deterioration, i.e. the increase of its electrical

resistance. A number of experiments were performed on a receptacle that has been used for many years (30 years in the analysed case), as well as on new receptacles, the electrical contacts of which were intentionally exposed to corrosion prior to the experiments. In order to accelerate the corrosion process, in one of the new receptacles the connection of the phase conductor was treated with aqua regia (concentrated HNO_3 : concentrated $\text{HCl} = 1:3$ (v / v)), and in the other the connection of the neutral conductor was treated with concentrated sulfuric acid (H_2SO_4). Using these chemicals the effect of long-term exposure of electrical contacts of electrical components to an acidic atmosphere was simulated. Comparing the results of the measurements aimed to analyze the effects of reducing the screw torque tightening at the receptacle terminals of the old (used) receptacle and two new receptacles (with deliberately corroded connections) on heating and electrical resistance of electrical contacts, it was shown that they possess similar characteristics.

In the available domestic and foreign standards and scientific literature, with the exception of several patents intended for industrial and special applications, methods and techniques that can be applied for the timely detection of poor electrical contacts in residential, commercial and public buildings have not been presented. Applying the method developed in this dissertation, intended for the detection of poor electrical contacts in electrical circuits, the probability of maintaining poor electrical contacts and dangerous „hot“ spots that may cause fire would be reduced (the method would be applied as part of the regular procedure for checking the efficiency of the protective measure based on the automatic switching off of the power supply in case of failure - by measuring both the line to earth and the line to neutral short circuit loop resistances). This would overcome the problem of the impossibility of a thermal imager to detect „hot“ spots in poor contacts that do not have direct visual contact with the camera sensor. The proposed method for detecting poor electrical contacts was applied in performing the verification of the quality of low-voltage electrical installations in old (10-60 years) residential buildings. The possibility of establishing a relation between the age of the residential buildings (more precisely, the age of their electrical installations) and the probability of the occurrence of a dangerous „hot“ spot in a poor electrical contact in the electrical circuits of single-phase and three-phase loads has also been explored. Unfortunately, this relation has not been established. Its establishment would

require to apply the new method for the detection of poor electrical contacts in thousands of receptacles in apartments of different ages.

An undetected poor electrical contact in an electrical installation may cause a series electric arc, which is a common cause of fire. Opposite to poor electrical contacts, series electric arcs can be detected using modern protecting devices. The functionality of the *AFDD* (*Arc-Fault Detection Device*), intended for the European market, the primary purpose of which is the protection against unwanted series arc, has been experimentally tested in laboratory conditions. The functionality test was based on a large number of laboratory experiments, by which almost all relevant situations of establishing a series electric arc for various combinations of materials of electrodes (copper–copper and copper–brass) have been simulated. In each of these cases, a timely response of the *AFDD* component has been registered. In addition, experiments aimed to check if the *AFDD* component does not operate during the normal operation of non-linear electrical loads containing power electronics (for example, personal computers, printers, microwave ovens, air conditioners, etc.), as well as loads containing collector motors (e.g., vacuum cleaners, drills, fans, etc.), were also successful. Based on the results of these experiments, a recommendation has been made for the installation of *AFDD* components in buildings in which a large number of people gather, i.e. an opinion on the adequacy of their application in the Republic of Serbia has been given.

Keywords: poor electrical contact, overlap of the contact elements, contact tightening torque, hot spot, fire, thermal imaging, series electric arc, contact resistance, periodical verification of low-voltage electrical installation

Scientific area: Electrical engineering

Specific scientific field: Power Engineering

UDK number: 621.3

САДРЖАЈ

| | |
|--|----|
| 1 УВОД..... | 1 |
| 1.1 Статистички подаци о пожарима..... | 2 |
| 1.1.1 Светски статистички подаци о пожарима чији су узрок електричне инсталације и пријемници електричне енергије..... | 5 |
| 1.1.2 Пријемници електричне енергије као узрок пожара..... | 9 |
| 1.1.2.1 Електрично ћебе као узрочник пожара..... | 9 |
| 1.1.2.2 Машина за сушење веша као узрочник пожара..... | 10 |
| 1.1.2.3 Телевизор као узрочник пожара..... | 11 |
| 1.1.3 Статистички подаци о пожарима у Србији..... | 13 |
| 1.2 Врсте кварова на електричним инсталацијама који могу изазвати пожар..... | 13 |
| 1.2.1 Електрични лук..... | 14 |
| 1.2.1.1 Угљенисање изолације..... | 16 |
| 1.2.1.2 Споља изазвана јонизација ваздуха..... | 18 |
| 1.2.1.3 Кратки спојеви..... | 18 |
| 1.2.2 Омско загревање без електричног лука..... | 20 |
| 1.2.2.1 Струјно преоптерећење проводника и осталих компоненти електричне инсталације..... | 20 |
| 1.2.2.2 Додатна топлотна изолација..... | 21 |
| 1.2.2.3 „Лутајуће“ струје и земљоспојеви..... | 21 |
| 1.2.2.4 Пораст напона изнад називне вредности..... | 22 |
| 1.2.2.5 Лоши електрични контакти..... | 24 |
| 1.2.3 Спољашње загревање..... | 28 |
| 1.2.4 Комбиновани кварови..... | 29 |
| 1.3 Класичне заштитне компоненте..... | 31 |
| 1.3.1 Топљиви осигурач..... | 31 |
| 1.3.2 Биметално заштитно реле..... | 32 |
| 1.3.3 Прекострујно реле..... | 32 |
| 1.3.4 Аутоматски и заштитни прекидач..... | 32 |
| 1.3.5 Заштитни уређај диференцијалне струје (ЗУДС)..... | 33 |
| 1.4 Примена технике термовизијског снимања..... | 35 |
| 1.4.1 Значај термовизијског прегледа..... | 37 |
| 1.4.2 Процедура термовизијске инспекције..... | 38 |
| 1.4.3 Документација о термовизијском снимању..... | 40 |
| 1.4.4 ΔT критеријуми за одлучивање..... | 41 |

| | |
|--|-----------|
| 1.4.5 Примена критеријума апсолутне температуре за електроинсталационе компоненте..... | 42 |
| 1.4.6 Примери из праксе..... | 43 |
| 1.5 Савремене заштитне компоненте за детекцију редног електричног лука | 47 |
| 1.5.1 AFCI компонента..... | 47 |
| 1.5.2 AFDD компонента | 49 |
| 1.5.3 AFD јединица..... | 49 |
| 1.5.4 Откривање редног електричног лука..... | 50 |
| 1.5.5 Заштита од нежељеног окидања | 52 |
| 1.5.6 Дијаграм самотестирања AFDD компоненте..... | 53 |
| 1.5.7 Поређење ефикасности заштитних компоненти | 54 |
| 1.6 Регулатива која се односи на верификацију квалитета нисконапонских електричних инсталација | 56 |
| 1.6.1 Провера визуелним прегледом..... | 57 |
| 1.6.2 Испитивање електричних инсталација електричним мерењима | 57 |
| 1.6.3 Почетна верификација квалитета нисконапонских електричних инсталација | 58 |
| 1.6.4 Периодична верификација квалитета нисконапонских електричних инсталација..... | 60 |
| 1.6.5 Преглед домаће и иностране регулативе..... | 61 |
| 1.7. Преглед публикованих резултата у вези са топлотним ефектима на лошем електричном контакту..... | 65 |
| 1.8. Предмет истраживања..... | 76 |
| 1.9. Структура докторске дисертације..... | 79 |
| 2 ЛОШ КОНТАКТ НАСТАО УСЛЕД СМАЊЕЊА ЕФЕКТИВНЕ ПОВРШИНЕ КОНТАКТА | 84 |
| 2.1 Поставка експеримената | 85 |
| 2.2 Резултати мерења и дискусија..... | 89 |
| 2.2.1 Комбинација електрода бакар–бакар..... | 92 |
| 2.2.2 Комбинација електрода бакар–месинг | 94 |
| 2.2.2.1 Површина преклапања електрода од 100%..... | 94 |
| 2.2.2.2 Површина преклапања електрода од 50%..... | 95 |
| 2.2.2.3 Површина преклапања електрода од 15%..... | 96 |
| 2.2.3 Комбинација електрода бакар–нерђајући челик | 97 |
| 2.2.3.1 Површина преклапања електрода од 100%..... | 97 |
| 2.2.3.2 Површина преклапања електрода од 50%..... | 98 |
| 2.2.3.3 Површина преклапања електрода од 15%..... | 99 |

| | |
|---|-----|
| 2.2.4 Визуелна презентација резултата истраживања | 100 |
| 2.2.5 Пример из праксе..... | 102 |
| 2.2.6 Закључци | 103 |
| 3 ЛОШ КОНТАКТ НАСТАО УСЛЕД РЕДУКЦИЈЕ МОМЕНТА ЗАТЕЗАЊА ЗАВРТЊА НА ПРИКЉУЧНОМ ЕЛЕМЕНТУ ЕЛЕКТРОИНСТАЛАЦИОНЕ КОМПОНЕНТЕ | 107 |
| 3.1 Поставка експеримента..... | 107 |
| 3.2 Резултати мерења и дискусија..... | 112 |
| 3.2.1 Прва серија експеримената..... | 112 |
| 3.2.2 Друга серија експеримената | 116 |
| 3.2.3 Финални експеримент | 122 |
| 3.3 Закључци | 125 |
| 4 РАЗВОЈ МЕТОДЕ ЗА ДЕТЕКЦИЈУ СТРУЈНИХ КОЛА У КОЈИМА ПОСТОЈЕ ЛОШИ ЕЛЕКТРИЧНИ КОНТАКТИ..... | 129 |
| 4.1 Експериментална поставка | 129 |
| 4.2 Резултати мерења и дискусија..... | 132 |
| 4.3 Метода за детекцију лошег електричног контакта у нисконапонским електричним инсталацијама | 139 |
| 4.4 Примена нове методе у пракси | 146 |
| 4.5 Закључак..... | 148 |
| 5 ИСПИТИВАЊЕ ФУНКЦИОНАЛНОСТИ РАДА AFDD КОМПОНЕНТЕ..... | 150 |
| 5.1 Експериментална провера функционалности AFDD компоненте..... | 151 |
| 5.2 Резултати и дискусија | 152 |
| 5.2.1 Резултати експеримената са термичким пријемницима..... | 153 |
| 5.2.2 Резултати експеримената са нелинеарним пријемницима | 154 |
| 5.2.3 Резултати експеримената са пријемницима који у свом саставу имају коллекторски мотор..... | 156 |
| 5.3 Техно-економска анализа | 157 |
| 5.4 Закључци и препоруке | 157 |
| 6 ЗАКЉУЧЦИ..... | 160 |
| 7 ЛИТЕРАТУРА | 170 |
| ПРИЛОГ 1 | 180 |
| ПРИЛОГ 2 | 182 |
| ПРИЛОГ 3 | 191 |
| ПРИЛОГ 4 | 200 |
| ПРИЛОГ 5 | 211 |
| БИОГРАФИЈА АУТОРА | 212 |

| | |
|--|-----|
| Изјава о ауторству | 217 |
| Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада | 218 |
| Изјава о коришћењу | 219 |

1 УВОД

Пожар је нежељена појава сједињавања ваздуха (тачније кисеоника), запаљиве материје и извора топлоте. Као што је познато, сваки пожар може да изазове материјалну штету, а неретко и губитак људских живота. Управо због тога свуда у свету се води мање или више уредна статистика о узроцима и последицама пожара, која је зато и представљена у уводном делу докторске дисертације. Према статистичким подацима, значајан удео у пожарима чине пожари настали на нисконапонским електричним инсталацијама, где кварови на електричним инсталацијама представљају опасан извор топлоте. Директним паљењем електричне изолације (најчешће *PVC*-а) или посредним паљењем околног запаљивог материјала пожари на електричним инсталацијама се најчешће брзо шире кроз објекат. Због тога је у уводном делу рада наглашено које све врсте кварова на електричним инсталацијама могу да узрокују пожар, а посебна пажња је посвећена лошем електричном контакту. Како би се стекао увид у могућности да се електричне инсталације заштите од појединих врста кварова и пожара које они изазивају, у уводном делу је представљен принцип рада свих класичних заштитних електричних компоненти, које се по правилу инсталирају у разводним таблама и орманима. Када се анализира ефикасност класичних заштитних компоненти у погледу детекције кварова, закључује се да су оне у потпуности неосетљиве на опасну појаву лошег електричног контакта. У наставку уводног дела су представљене савремене технике за превентивну детекцију лошег електричног контакта (термовизијско снимање), као и савремене заштитне компоненте помоћу којих може да се детектује редни електрични лук (и искључи струјно коло са кваром), који се по правилу јавља на месту настанка лошег електричног контакта који није на време детектован и отклоњен. На крају уводног дела дат је преглед домаће и стране регулативе која садржи методе и процедуре за проверу (верификацију) квалитета нисконапонских електричних инсталација, са посебним освртом на њене недостатке у погледу детекције лоших електричних контаката и „врелих“ тачака насталих на њима. Уводни део се завршава комплетним прегледом публикованих стручних и научних резултата у Републици

Србији и у свету у вези са лошим електричним контактом, као и структуром докторске дисертације и њеним предметом истраживања.

1.1 Статистички подаци о пожарима

Свака европска земља прикупља податке о пожарима према сопственој статистичкој методи. Још увек не постоје европски стандарди којима се дефинишу начини прикупљања, анализе и публиковања статистичких података о пожарима. Због тога се мора уложити много напора при упоређивању статистика о пожарима које су публиковале разне европске земље. Велики проблем представља и чињеница да се информација о релативно великом броју пожара који се пријаве ватрогасним бригаама не прослеђује националним бироима и службама за вођење статистике о насталим пожарима. На основу статистичких података установљено је да нпр. у Великој Британији није пријављено 78% пожара, док у Аустралији није пријављено 75,2% пожара [1]. Претпоставља се да је и у другим државама само четвртина од укупног броја насталих пожара пријављена за статистичку обраду. Углавном се не пријављују пожари који нису изазвали велике материјалне штете (пожари угашени у њиховој почетној фази) и у којима нису изгубљени људски животи (нису били тзв. фатални пожари).

У извештају [2] приказана је статистика пожара у Европи за неколико европских земаља за које су добијени подаци о пожарима и жртвама. Подаци приказани у том документу односе се на све пожара који су настајали како у домаћинствима тако и у пословним и јавним објектима. У документу је такође констатовано да је тешко упоређивати статистике различитих држава, јер су подаци националних статистичких бироа и служби разноврсни: поједини бирои и службе су приказали податке који се односе само на број фаталних пожара, док су други приказали одвојено или заједно податке који се односе на мале и фаталне пожаре. Од европских држава, најкомплетнију статистику о пожарима приказали су национални статистички бирои и службе Велике Британије [3] и Холандије [4]. Осим података из европских држава, значајни су и статистички подаци из САД, Канаде, Аустралије и Новог Зеланда, који су такође веома детаљно и свеобухватно обрађени и приказани.

Број пожара на 1000 становника за 18 држава Европске уније анализиран је у извештају [5]. Разлике су веома велике. На пример, истиче се да је број пожара на 1000 становника веома мали у Холандији и Словачкој (где редом износе 0,8 и 1,9), а веома велики у Великој Британији, Ирској и Естонији (где редом износе 7,4, 7,6 и 8,9).

Подаци добијени за 27 земаља Европске уније показали су да је нпр. у 2004. години у пожарима укупно погинуло преко 8000 особа. *CTIF (International Association of Fire and Rescue Service)* објавио је извештај [5] у коме се наводи да су у пожарима 2004. године у Естонији, Летонији, Литванији, Словачкој, Мађарској, Бугарској, Пољској, Чешкој, Словенији, Аустрији, Немачкој, Француској, Грчкој, Холандији, Ирској, Великој Британији, Шведској и Финској погинуле 5483 особе. Подаци о броју страдалих за Данску, Белгију, Луксембург, Италију, Шпанију, Португал, Кипар, Малту и Румунију нису били обезбеђени од стране њихових националних статистичких бироа, али је њихов број процењен на 2665 особа. Процена је извршена на основу средње вредности од 17,3 погинула у пожарима на милион становника, који је познат за 154,4 милиона становника Европске уније, и укупног броја становника оних земаља Европске уније за које статистички подаци нису били доступни.

Број страдалих у пожарима највећи је у Пољској, Великој Британији, Француској и Немачкој (450–550 страдалих у пожарима годишње). Међутим, број погинулих на милион становника највећи је у Летонији, Естонији и Литванији (где редом износи 60, 55 и 53), а веома је мали у Холандији, Немачкој и Аустрији (где износи око 5).

У светским статистикама узроци пожара се деле у две групе: узроци пожара настали услед незнања људи, њихове несмотрености, немарности, као и застарелости и кварова на уграђеним електричним инсталацијама и узроци пожара настали коришћењем пријемника електричне енергије, када грешке у њиховој изведби или дотрајалости могу да доведу до пожара. Остали фактори који пружају информације о сценарију настанка пожара су време детекције прве појаве пожара, време за узбуњивање и долазак ватрогасне бригаде на место пожара, постојање стабилних система за аутоматску дојаву и гашење пожара итд.

У извештају [5] су представљени главни резултати истраживања узрока пожара у неколико европских земаља, као и у развијеним земљама западног света. Класификација узрока пожара варира од земље до земље, али се у већини извештаја помињу следећи узроци пожара:

- пироманија,
- пушење,
- кување,
- употреба свећа,
- употреба пријемника електричне енергије,
- употреба грејних тела,
- играње ватром итд.

На први поглед се може приметити да не постоји посебно издвојена целина у којој се као узрок пожара наводи коришћење електричне енергије. Нису узети у обзир пожари који настају на уграђеној електричној инсталацији (која служи за пренос електричне енергије до пријемника), већ су само анализирани пожари које изазивају пријемници електричне енергије и грејна тела. На овај начин се прави груба грешка и пажња скреће са правог проблема који представља сталну опасност од настанка пожара – то су старе и неодржаване електричне инсталације.

У табели 1 је приказан преглед фаталних пожара (са губицима људских живота), који су разврстани према узроку пожара.

Табела 1. Преглед фаталних пожара [5]

| Узрок | Велика Британија | Холандија | Шведска | САД | Нови Зеланд |
|--------------------------------|------------------|-----------|---------|-------|-------------|
| Намерно изазван пожар | 35,4% | 9% | 8,3% | 11,5% | 4,6% |
| Пушење | 16,7% | 31% | 29,8% | 7,8% | 13,1% |
| Кување | 5,6% | 9% | 5,8% | 2,2% | 16,9% |
| Употреба свећа | 5,8% | 3% | 5% | 5,6% | 10% |
| Пријемници електричне енергије | 7,6% | 21% | 12,4% | 3,4% | 13,1% |
| Употреба грејних тела | 1,5% | 3% | 5,8% | 3,4% | 6,9% |
| Несмотреност | 0,5% | 12% | 2,5% | | 4,6% |
| Играње ватром | 3,3% | 6% | 0% | 1,5% | 9,2% |
| Остало | 23,5% | 6% | 0% | 6,8% | 13,9% |
| Непознат | 0,1% | 0% | 30,4% | 57,8% | 7,7% |

На основу података приказаних у табели 1 може се закључити да је највећи број фаталних пожара настао услед пушења. Следећи узрочници по проценту учесталости настанка фаталних пожара су радне активности у кухињи и употреба пријемника електричне енергије.

1.1.1 Светски статистички подаци о пожарима чији су узрок електричне инсталације и пријемници електричне енергије

У даљој анализи светске статистике о насталим пожарима посебна пажња је посвећена пожарима насталим на пријемницима електричне енергије и уграђеним електричним инсталацијама, јер су они од посебног интереса за проблематику коју обрађује ова докторска дисертација. Тачно је да, статистички гледано, број пожара које су изазвале грешке у раду пријемника електричне енергије није велики. Међутим, реч је само о пожарима на пријемницима као малом делу укупног система електричних инсталација и апарата у посматраном објекту. Број кварова на електричној инсталацији уграђеној у објекат значајно је већи (што ћемо касније видети из статистичких података који се односе на САД, који су најдетаљнији по овом питању). Може се са великом вероватноћом претпоставити да се у пожарима чији узроци нису расветљени крије велики број пожара чији је узрок квар на уграђеној електричној инсталацији. Непрописно пројектоване или неправилно изведене електричне инсталације, њихово преоптерећење, као и коришћење неквалитетних (несертификованих) продужних каблова и других електроинсталационих компоненти, узроци су великог броја пожара.

Према статистичким подацима Националног ватрогасног друштва САД [6], прикупљеним у периоду 1993–1997. године, у САД се током овог периода у стамбеним објектима годишње догодило око 41.200 пожара изазваних неком врстом квара на електричним инсталацијама. У посматраним пожарима се на годишњем нивоу догодило 336 смртних случајева и 1446 повреда цивила, док је материјална штета износила 643,9 милиона америчких долара. Пожари настали услед квара на електричним инсталацијама учествовали су са 9,7% у укупном броју пожара насталих у посматраном периоду у САД, захваљујући чему су заузели пето место на листи од 12 најчешћих врста пожара (разврстаних према

узроку). Материјална штета од 643,9 милиона долара представља 14,4% укупне материјалне штете настале у свим пожарима у посматраном периоду, стављајући кварове у вези са електричним инсталацијама на друго место ранг-листе узрочника. У табели 2 приказана је процентуална расподела пожара у САД изазваних кваром на електричним инсталацијама према месту настанка квара у напред поменутом периоду 1993–1997.

Табела 2. Процентуална расподела пожара према месту настанка квара [6]

| МЕСТО НАСТАНКА КВАРА | % |
|---|------|
| Проводници уграђени у објектима | 34,7 |
| Каблови и утикачи | 17,2 |
| Светиљке | 12,4 |
| Прекидачи, продужни каблови и утичнице | 11,4 |
| Извори светлости | 8,3 |
| Осигурачи, главни прекидачи, разводне табле | 5,6 |
| Мерни уређаји и њихова кућишта | 2,2 |
| Енергетски трансформатори | 1,0 |
| ОСТАЛО | 7,2 |

Међутим, на основу великих материјалних губитака изазваних пожарима који су настали услед кварова на електричним инсталацијама не може се извући закључак да су изведени системи напајања прикључених пријемника непоздани (веза пријемника преко уградних утичница и продужних каблова). Доказ за ову тврдњу се лако изводи: у САД, у око 100 милиона стамбених јединица са просечно 5,4 собе, живи око 270 милиона људи. Ако у свакој соби постоје четири утичнице, број могућих прикључених пријемника износи: $4 \cdot 5,4 \cdot 100 \cdot 10^6 = 2,16$ милијарди. Потребно је извршити редукцију добијеног броја због чињенице да нису на свим утичницама увек прикључени пријемници. Може се оправдано претпоставити да је на половину укупног броја утичница директно прикључен пријемник. Ако претпоставимо да су на половину преосталих утичница прикључени продужни каблови на којима, у просеку, једна утичница напаја пријемник, стваран број пријемника електричне енергије у САД може да се процени на $\frac{3}{4}$ од 2,16 милијарди, односно 1,62 милијарде. Како, према напред поменутој статистици [6], $0,114 \cdot 41.200 \approx 4700$ пожара годишње настаје услед квара на прекидачима, продужним кабловима и утичницама, и како, према истој статистици, они учествују са само 28,6% у наведеном броју пожара (4700),

закључује се да је око 1344 пожара годишње настало услед квара на вези пријемника и извора напајања. Дакле, вероватноћа да у временском периоду од годину дана конкретна веза пријемник–утичница изазове пожар процењује се на $1344/1,62 \cdot 10^9$ или $0,83 \cdot 10^{-6}$. Веома мала вероватноћа настанка пожара узрокованих оваквим кваровима показује да су изведени системи напајања прикључених пријемника поуздани са аспекта изазивања пожара. Међутим, иако је вероватноћа настанка оваквих кварова мала, проблем је у чињеници да је на нисконапонску дистрибутивну мрежу прикључен екстремно велики број пријемника, који расте из дана у дан.

У европским државама у којима постоји статистика о узроцима пожара утврђено је да су кварови на електричним инсталацијама узрочници 15–20% укупног броја пожара [7]. Према истим статистикама из 11 европских земаља (Бугарска, Чешка Република, Француска, Мађарска, Италија, Пољска, Румунија, Русија, Турска и Украјина), у периоду од 1988. до 1998. године, број пожара који су узроковани кваром на електричним инсталацијама повећао се за 25%, са тенденцијом даљег раста. Занимљиво је да је у истом периоду пораст броја пожара изазваних неелектричним узроцима износио само 5%. Ова констатација се може објаснити чињеницом да се електричне инсталације нередовно одржавају, и непрекидно старе, као и да се број пријемника електричне енергије из године у годину повећава (посебно је примећен нагли пораст броја пријемника велике снаге који се користе за климатизацију и грејање зграда).

У референци [8] се указује на чињеницу да је број насталих пожара у домаћинствима знатно већи због техничких грешака насталих у систему напајања електричних пријемника, а не због техничких грешака насталих на пријемницима електричне енергије.

Каблови и остале компоненте електричне инсталације имају очекивани животни век који није увек једнак животном веку зграде. Осим уграђене електричне инсталације, светиљке, утичнице, и продужни каблови такође представљају озбиљне проблеме. У периоду од 2003. до 2005. године (закључно са 2005) у САД се десило 28.300 оваквих пожара, који су узроковали 360 смртних случајева, 1000 повреда и материјалне трошкове у износу од 995 милиона америчких долара. У овом трогодишњем периоду, 7% свих пожара у стамбеним

објектима изазвано је електричним инсталацијама или пријемницима [8]. У табели 3 је приказана процентуална расподела пожара насталих на електричној опреми и инсталацијама у анализираном периоду (2003–2005).

Табела 3. Електрична опрема и делови електричних инсталација који су учествовали у изазивању пожара [8]

| МЕСТО НАСТАНКА КВАРА | % |
|---|------|
| Проводници уграђени у објекат, прекидачи, продужни каблови и утичнице | 46,8 |
| Каблови и утикачи | 11,3 |
| Светиљке | 23,5 |
| Систем преноса електричне енергије | 3,1 |
| Разводни орман | 3,7 |
| Грејна тела | 9,9 |
| ОСТАЛО | 1,7 |

Већина „неелектричних“ пожара у стамбеним објектима остаје ограничена само на предмете њиховог настанка (у 62% случајева), док је ситуација код „електричних“ пожара насталих у домаћинствима обрнута – они се веома често прошире кроз цео објекат (прво на собу, потом спрат, зграду...) [8]. Уграђени лакозапалјиви конструкциони делови и електрична изолација дају највећи допринос брзом ширењу пожара кроз објекат.

На основу података приказаних у табели 3 види се да велики проценат пожара на електричним инсталацијама потиче од кварова на уграђеним проводницима у објекту (фиксне електричне инсталације). Према неким статистичким подацима [8], више од трећине кућа и станова у САД (преко 30 милиона домова), старије је од 50 година. Преоптерећење електричних инсталација у тим објектима доводи до прегревања проводника и осталих компоненти који су већ у лошем стању. Станари често додају нове утичнице или нова струјна кола (и инсталирају нове аутоматске прекидаче у разводним таблама, па чак и потпуно нове разводне табле). На овај начин се често преоптерећује електрична инсталација објекта која, деценијама раније, није пројектована за новоинсталисану снагу. Корисници електричне енергије овако изазивају притајену опасност у својим домовима, која нон-стоп вреба. Након трајно насталог преоптерећења у електричној инсталацији, која је потенцијални узрочник пожара, прво се пали електрична изолација, а затим се пожар брзо

преноси на завесе, подове, тапете и намештај. У 30% пожара насталих на електричним инсталацијама прво се упали електрична изолација проводника или каблова [8].

1.1.2 Пријемници електричне енергије као узрок пожара

У наставку се износе статистички подаци о пожарима насталим услед квара на три врсте пријемника које предњаче по броју изазваних пожара. То су електрична ћебад, машине за сушење веша и телевизори.

1.1.2.1 Електрично ћебе као узрочник пожара

Половина свих пожара насталих због електричних кварова између 1996. и 2000. године у Великој Британији (8% свих фаталних пожара) проузрокована је кваром на електричном ћебету [9]. То практично значи да се око 5000 пожара и 20 жртава годишње деси због оштећења електричног ћебета. У САД се у периоду 1992–2002. догодило више од 35.000 пожара изазваних кваром у електричном ћебету, при чему је страдало 40 особа. Електрична ћебад најчешће изазивају пожар услед њихове похабаности, јер временом настају техничка оштећења грејача и његовог ожичења. Похабаност настаје услед великих механичких оптерећења која електрични проводници унутар ћебета трпе током дугогодишње употребе. Други разлог због кога електрична ћебад изазивају пожаре је њихово неправилно коришћење (на пример, пресавијање ћебета када се оно не користи). Још један од узрока пожара лежи у чињеници да ћебад произведена пре 1990. године нису имала адекватну заштиту од прегревања [10].

Владина лабораторија за испитивање безбедности купаца, која ради у оквиру Министарства трговине и индустрије Велике Британије [11] 1999. године истраживала је пожаре које су проузроковала електрична ћебад. После дисеминације резултата овог истраживања становништву Велике Британије број жртава у пожарима које изазивају електрична ћебад рапидно се смањио.

У Великој Британији се 1985. године десило преко 2000 пожара (у чијем су гашењу интервенисали ватрогасци) који су били изазвани кваровима на електричној ћебади. Из статистике вештака се види да су кварови на електричној ћебади узроковали много више пожара због којих нису позвани ватрогасци, већ су их угасили укућани. Број људских жртава услед пожара изазваних кваром на

електричној ћебади смањио се са 32, колико их је било 1985. године, на 19 колико их је било 1996. године, што представља смањење од око 40%. Више од 90% свих пожара изазваних кваровима на електричној ћебади чинили су пожари на ћебадима старијим од 10 година [11].

1.1.2.2 Машина за сушење веша као узрочник пожара

Током 2000. године Комисија за безбедност производа у САД (*Consumer Product Safety Commission – CPSC*) спровела је студију која се односила на машине за сушење веша као узрочнике пожара. У САД електрични сушачи су 1998. године изазвали укупно 8600 пожара, са 10 жртава и 170 повређених [12]. Најважније узроке пожара насталих због сушача испитивала су два института. Табеле 4 и 5 приказују резултате њихових истраживања.

Табела 4. Узроци престанка рада електричног сушача веша који изазивају пожар, студија *US-CPSC* [12]

| Кварови на електричном сушачу | Учешће у укупном броју пожара [%] |
|--|-----------------------------------|
| Електрични квар | 24 |
| Немогућност нормалног струјања ваздуха | 22 |
| Механички квар | 8 |
| Извор топлоте | 8 |
| Неправилна употреба | 5 |
| Непознати | 33 |
| Укупно | 100 |

Табела 5. Узроци престанка рада електричног сушача веша који изазивају пожар, студија *USA Home Product Report* [12]

| Кварови на електричном сушачу | Учешће у укупном броју пожара [%] |
|-------------------------------|-----------------------------------|
| Лоше одржавање | 29 |
| Електрични квар | 20 |
| Механички квар | 20 |
| Неправилно руковање | 10 |
| Непознати | 21 |
| Укупно | 100 |

Прво што се може закључити је да класификација кварова није иста у обе студије. Немогућност нормалног струјања ваздуха (податак у табели 4) вероватно је последица лошег одржавања (податак у табели 5). Анализа резултата тестова спроведених од стране *US-CPSC*-а показује да је због нагомиланих влакана у

филтеру и спољашњем вентилационом систему сушача размена ваздуха отежана, тако да температура у унутрашњости сушача расте. Како не постоји обавеза да сушачи имају термички сензор, а већина сушача га заиста и нема, такви сушачи неће аутоматски престати са радом ако температура у њиховој унутрашњости пређе гранично дозвољену вредност. Последишно долази до кварова на електричним компонентама који изазивају паљење и пожар. Сматра се да је најважнији узрок настанка пожара на сушачу отежана размена ваздуха услед наталожених влакана.

Други могући узрок пожара на сушачу је квар на мотору који окреће бубањ [12]. Закључци истраживања *US-CPSC*-а углавном се слажу са закључцима студије о сушачима коју је спровело холандско тело надлежно за безбедност хране и производа (*NVWA – Dutch Food and Consumer Product Safety Authority*). Истраживање је извршено на основу интервјуа са експертима из ове области и на основу експеримената са неоштећеним сушачима. Већина експерата је претпоставила и експериментално потврдила да је акумулирање влакана у комбинацији са прегревањем електричних компоненти најважнији узрок пожара на електричним сушачима веша [13].

1.1.2.3 Телевизор као узрочник пожара

У Европској унији се сваке године десе тзв. ТВ пожари у којима страда око 16 и буде повређено око 197 особа [14]. То је само процењено стање, а стварни број повређених и страдалих је знатно већи, јер има земаља Европске уније које не воде издвојену статистику о ТВ пожарима. У Данској се просечно деси 1,25 фаталан ТВ пожар годишње, што одговара 0,31 смртном исходу годишње на милион телевизора. У Француској се деси око 330 ТВ пожара годишње, са просечно 38 пожара годишње у којима има повређених и 2 пожара годишње са фаталним исходом. У Немачкој (на основу процене) у ТВ пожарима годишње страдају 2-4 особе. У Холандији 1,1% свих пожара у домаћинствима започне у телевизору. Од укупног броја насталих пожара на електричним апаратима, у Холандији су ТВ пожари на другом месту узрочника, одмах иза машина за прање и сушење веша. У Португалији мање од једне особе годишње страда у ТВ

пожарима. У Шведској је овај број око једне особе годишње. У Италији је број овако страдалих занемарљив [14].

Од свих пожара насталих у домаћинствима Велике Британије у телевизорима стартује око 2% пожара. Када се запале, телевизори проузрокују најмањи број жртава од свих врста електричних уређаја у домаћинству. Електрични бокали и слични уређаји, грејачи, ћебад и кварови у електричним инсталацијама узрокују далеко више жртава у Великој Британији. Број пожара у Великој Британији услед кварова на телевизорима смањено се од 1300 пожара 1983. године на 400 пожара 1993. године. После 1993. године број таквих пожара се поново увећао. Повећање након 1993. године објашњава се повећањем броја телевизора (више од једног телевизора по домаћинству) и дужим временским интервалом коришћења старих телевизора.

У САД број ТВ пожара на милион телевизора је око 28% мањи него у Великој Британији. Објашњење ове разлика је у материјалима од којих се производе телевизори (у САД су саставне компоненте телевизора знатно мање запаљиве). У САД се употребљавају материјали који су ретарданти ватре, тј. не потпомажу процес горења [14].

Закључак је да су телевизори узрок пожара у европским земљама, али да у тим пожарима релативно мало људи страда или буде повређено. Већина ТВ пожара је узрокована кваром уређаја (87%) и прегревањем због дуготрајног рада (4%). Други узроци ТВ пожара су неелектричне природе (нпр. екстерни извор топлоте, као што је горећа свећа која се стави близу телевизора). У Финској, око 40% свих ТВ пожара је узроковано спољашњим извором топлоте [15].

Истраживање Одбора за надзор тржишта Данске агенције за контролу електричне опреме (*Market Surveillance Board of Danish Electrical Equipment Control Office*) показује да ТВ уређаји након паљења бурно горе, што може довести до велике материјалне штете у окружењу [15].

ТВ пожари се у Великој Британији дешавају на телевизорима различите старости. Око 80% пожара се деси у десетогодишњем периоду након куповине, а 50% у првих пет година коришћења ТВ уређаја. Већина ТВ пожара се догодила у децембру и јануару, нарочито поподне и увече. Највише ТВ пожара започне у дневној (71%) и спаваћој соби (22%).

1.1.3 Статистички подаци о пожарима у Србији

У овом поглављу се анализирају статистички подаци о пожарима у Републици Србији (расподела према објекту–простору настанка пожара, узроцима настајања и материјалној штети – видети табеле 1-3 дате у Прилогу 1), који су добијени 2011. године од Управе за аналитику МУП-а РС, Сектора за ванредне ситуације у Београду.

Анализом података за период од 1998. до 2009. године утврђено је да пожари на електричним инсталацијама у Републици Србији учествују у укупном броју пожара са 20-30%. Просечна материјална штета настала у пожарима у Републици Србији у том периоду износила је 950 милиона динара годишње, тако да је материјална штета настала у пожарима који су изазвани кваровима на електричним инсталацијама била у опсегу од 190 до 285 милиона динара годишње. Занимљив је податак да је у Републици Србији 2004. године било 1,37 пожара на 1000 становника, али је до 2011. године тај број непрекидно растао до 4,4 пожара на 1000 становника. Узимајући у обзир да је просечан годишњи број погинулих у пожарима у Србији око 80, долазимо до податка да је број погинулих на милион становника у Републици Србији око 10,66. Упоређујући ове вредности са одговарајућим подацима који се односе на земље Европске уније, долази се до закључка да се статистика за Републику Србију приближно поклапа са европском статистиком. Процену броја жртава у пожарима у Републици Србији насталим услед квара на електричној инсталацији није могуће извршити.

1.2 Врсте кварова на електричним инсталацијама који могу изазвати пожар

Испитивању кварова на електричним инсталацијама који су изазвали пожар могуће је приступити на више различитих начина:

1. утврђивањем радњи или пропуста који су довели до кварова на електричним инсталацијама,
2. класификовањем кварова према функционалној природи пријемника или неког његовог дела на коме се квар десио, и

3. проучавањем физичких основа настанка пожара узрокованих кваровима на електричним инсталацијама.

Сва три начина испитивања и анализе кварова незаобилазни су при реконструкцији догађаја (вештачењу), тј. извођењу експеримената помоћу којих се симулирају кварови на електричним инсталацијама (на основу њих се анализира утицај оваквих кварова на могућност настанка пожара). Такође, они представљају добру основу за даљи рад, и то како на развоју методологије за вршење превентивних периодичних верификација квалитета нисконапонских електричних инсталација тако и на развоју процедуре за детекцију кварова (нпр. лошег електричног контакта) на електричним инсталацијама који се не могу детектовати и изоловати помоћу класичних заштитних компоненти (топљиви уметак, аутоматски прекидач, ЗУДС, прекострујно реле, биметално реле итд. [16]).

Основни кварови на електричним инсталацијама који могу довести до паљења електричне изолације или запаљивих материјала у близини електричне инсталације су [17, 18]:

1. електрични лук (редни и паралелни),
2. велико омско загревање без електричног лука, и
3. спољашње загревање.

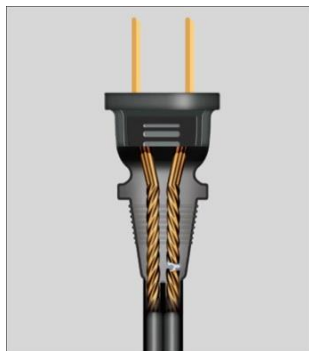
Важно је напоменути да неки пожари настају комбинацијом наведених кварова (тзв. комбиновани кварови).

1.2.1 Електрични лук

Електрични лук представља струју кроз непотпуно јонизовану плазму, насталу ударном јонизацијом гасова и пара, створених загревањем делова око врхова електрода. Чврст материјал врхова електрода преводи се, преко течне и гасовите фазе, у фазу непотпуно јонизоване плазме. У референци [19] дат је опис физичких процеса у електричном луку. У нормалним условима, под утицајем потенцијалне разлике између две блиско постављене електроде раздвојене изолатором, у струјном колу се региструје успостављање електричне струје. Температура изолатора расте, услед чега он испарава и расте број слободних носилаца наелектрисања у њему, што резултује смањењем отпорности и порастом

струје. Када температура контакта прогресивним процесом достигне одређену вредност, формирају се услови за одржавање лука. Потребно је да постоји гасна средина која омогућава интензивно кретање носилаца електрицитета како би се електрични лук успоставио и одржао. Карактеристике лука су велика густина струје, мали катодни пад напона и висока температура у јонизованој области (2000–6000 °C [20]).

По свом положају у струјном колу електрични лук може бити редни – серијски (слика 1), или паралелни – оточни (слика 2). У оквиру струјног кола редни електрични лук се може јавити на било ком месту од разводне табле до пријемника електричне енергије, укључујући разводну таблу и сам пријемник. Паралелни електрични лук се може јавити између фазног и неутралног проводника, између неутралног проводника и масе (или заштитног проводника), као и између фазног проводника и масе (или заштитног проводника).



Слика 1. Редни (серијски) електрични лук [21] Слика 2. Паралелни (оточни) електрични лук [21]

Треба истаћи да, са гледишта опасности од настанка пожара, постоји значајна разлика између редног и паралелног електричног лука. У случају појаве редног лука, у струјном колу у коме се лук појавио струја опада због пораста импедансе у колу, па се са сигурношћу може очекивати да прекострујна заштита неће реаговати нити искључити напајање струјног кола у коме се лук појавио. Како квар оваквог типа може неометано да траје, вероватноћа настанка пожара је велика. Због чињенице да су све класичне заштитне компоненте практично неосетљиве на редни електрични лук, управо је он један од најчешћих узрока пожара изазваних кваровима у електричним инсталацијама [22]. За разлику од редног, паралелни лук најчешће бива прекинут брзим деловањем неке од

класичних заштитних компоненти, јер у том случају струја у струјном колу, због наглог пада његове импедансе, веома брзо порасте до вредности која обезбеђује ефикасно реаговање заштитне компоненте.

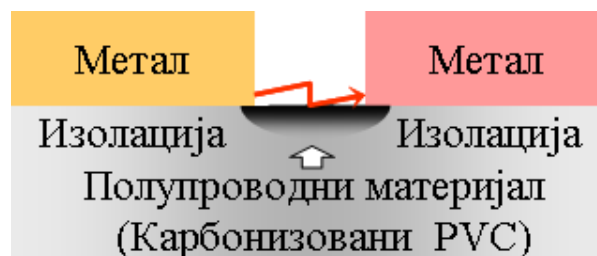
Најчешћи узроци појаве електричног лука су:

1. угљенисање изолације (тзв. трасирање лука),
2. споља изазвана јонизација ваздуха (пламеном или претходно успостављеним електричним луком), и
3. кратак спој (неметални).

1.2.1.1 Угљенисање изолације

У наизменичним струјним колима није тешко изазвати и одржати електрични лук ако постоји угљенисана проводна путања. Познато је да има више начина да се створи таква путања у или на изолационом материјалу. Најједноставнији начин је да се изолација изложи високом напону, услед чега долази до њеног пробоја. Други начин, који је у пракси чешћи, укључује комбиновани ефекат влаге и нечистоће на површини изолације, услед чега долази до струје „цурења“ преко површине изолације проводника, што временом доводи до формирања угљенисане путање. Вероватноћа да до овакве појаве дође значајно је већа на старим и неодржаваним електричним инсталацијама, а посебно ако су оне изложене неповољним атмосферским утицајима.

На слици 3 се може видети пример таквог начина успостављања редног електричног лука.



Слика 3. Успостављање редног електричног лука преко делимично проводне површине

Изолациони материјали се веома разликују према отпорности на трасирање лука. У нисконапонским инсталацијама углавном се користе проводници са *PVC* изолацијом, али, нажалост, *PVC* је један од најлошијих полимера у погледу отпорности на стварање карбонизоване путање за електрични лук. При излагању

PVC изолације температурама од 200 °C до 300 °C у њој се одиграва процес угљенисања, а део изолације који је угљенисан добија полупроводничке особине, чиме се омогућавају појаве струје „цурења“ и електричног лука [6]. Када се *PVC* изолација једном оштети прегревањем (тзв. термичка деградација изолације), њена диелектрична чврстоћа знатно опада, па може доћи до електричног пробоја изолације и при називном напону и радној температури.

Могуће је да се на проводницима са термички оштећеном *PVC* изолацијом догоди паралелан кратак спој и успостави следећи самоодржавајући циклични процес [6]:

- почетни ток струје „цурења“ дешава се због постојања угљенисаног слоја изолације,
- изолација се загрева услед струје „цурења“ и додатно угљенише, чиме се још више смањује отпорност изолације,
- услед смањења отпорности изолације струја „цурења“ се повећава, све до појаве паралелног електричног лука,
- електромагнетске силе на месту успостављеног електричног лука распршују истопљене делове проводника,
- када се истопљени делови проводника који су формирали електрични лук распрше, отпорност успостављеног контакта се тренутно повећа, а јачина струје смањи, или прекине,
- међутим, струја „цурења“ и даље постоји кроз угљенисани материјал, што може довести до даљег смањења отпорности изолације, топљења метала и повећања струје.

Иако цикличан, овај процес не траје исто сваки пут, нити се одиграва са истом максималном јачином струје. Типичне максималне јачине струја које се успостављају у току објашњеног процеса нису веће од 50 А, мада, иако ретко, могу достићи и вредност од 250 А. Стога је заштитној компоненти потребно одређено време да реагује при описаној појави. Услед тога, квар може да постоји довољно дуго, све док се не створе услови за настанак почетног пожара.

1.2.1.2 Споља изазвана јонизација ваздуха

Природна диелектрична чврстоћа ваздуха је 3 MV/m , али електрични пробој може да се догоди и при знатно мањим вредностима електричног поља ако је ваздух јонизован. Ваздух се може јонизовати пламеном или раније успостављеним електричним луком. Експерименти су показали да у пламену диелектрична чврстоћа ваздуха пада на око $0,11 \text{ MV/m}$ [6]. Ако се, на пример, квар у облику електричног лука појави у дистрибутивном воду, створиће се велика количина јонизованих гасова који могу да пређу релативно велико растојање за кратко време. Уколико јонизовани гас на свом путу наиђе на друго електрично коло, може да изазове нови квар и појаву новог електричног лука на другој локацији.

1.2.1.3 Кратки спојеви

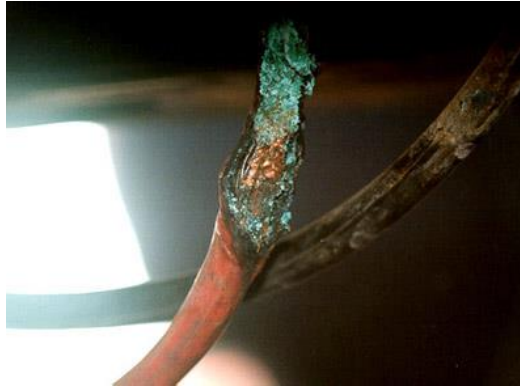
Кратак спој је назив за изненадни квар који настаје услед наглог смањења отпорности и повећања струје у струјном колу. Може да има два облика:

1. директан кратак спој, код којег је остварен добар контакт метала са металом, изведен преко пуног попречног пресека – тзв. метални кратак спој, и
2. варничење, код којег не постоји почетни контакт метала са металом, већ се успоставља струја електричног лука – тзв. кратак спој преко електричног лука.

Код директног кратког споја повећано грејање није локализовано на месту квара, већ је распоређено дуж целог струјног кола. Аутоматски прекидач (топљиви уметак осигурача) обично прекине напајање струјног кола пре него што се било шта упали услед повећане температуре. Заправо, веома је тешко директним кратким спојем изазвати пожар у добро пројектованим и правилно изведеним електричним инсталацијама.

Кратак спој преко електричног лука резултат је краткотрајног контакта два огољена проводника. При њиховом додиру тренутно се успоставља велика струја која изазива топљење материјала и јонизовање гасова у непосредном окружењу претходно оствареног контакта. Магнетске силе теже да раздвоје проводнике, али док се они потпуно не раздвоје постоји струја у проводном мосту од течног метала и јонизованих гасова (електрични лук). Успостављени проводни мост се

ипак магнетским силама прекида, и то распршивањем ужарених капљица метала (варница). По завршетку кратког споја са електричним луком, могу се видети оштећене површине на проводницима већег пречника, док проводници мањег пресека могу бити потпуно уништени на месту појаве лука [18]. На сликама 4 и 5 приказани су примери оштећења насталих услед кратког споја преко електричног лука.



Слика 4. Последице оштећења електричног проводника услед кратког споја преко електричног лука

Експерименти су показали да кратак спој преко електричног лука може бити узрок пожара уколико капи ужареног метала дођу у додир са запаљивим материјалима, као што су нпр. папир или платно [19].



Слика 5. Последице кратког споја преко електричног лука код кога је дошло до појаве истопљених капљица метала

Овакав кратак спој може да настане на месту пресецања или кидања напојног енергетског кабла, између огољених делова проводника кабла. Вероватноћа појаве кратког споја на месту пресецања кабла повећава се са повећањем угла који правац реза заклапа са осом кабла, јер се тиме повећавају

додирне површине огољених проводника. Разни облици деградације изолације могу да буду узрок настанка кратког споја преко електричног лука. Примери деградације изолације су:

- механичко оштећење услед увртања проводника,
- механичко оштећење настало употребом бушилице,
- оштећење услед повећане влажности на месту полагања проводника.

Напоменимо да деградацију изолације може изазвати и топлота која настаје при раду неког пријемника или електроинсталационе компоненте који се налазе у непосредној близини проводника.

1.2.2 Омско загревање без електричног лука

Могући узроци омског прегревања могу бити:

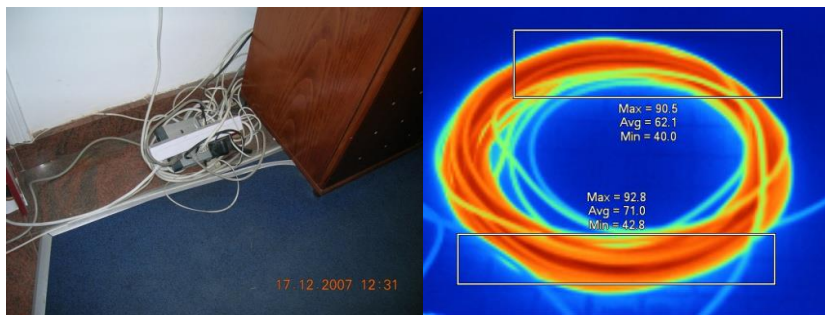
1. струјно преоптерећење електричне инсталације,
2. додатна топлотна изолација,
3. „лутајуће“ струје и земљоспојеви,
4. пораст напона изнад називне вредности, и
5. лош контакт проводника на месту његовог прикључка.

1.2.2.1 Струјно преоптерећење проводника и осталих компоненти електричне инсталације

Експериментима је показано да се струјним преоптерећењем компоненте електричних инсталација могу загрејати до високих температура. Међутим, да би дошло до настанка почетног пожара, јачина струје у њима мора да буде чак 3 до 7 пута већа од називне [6]. Пошто је већина струјних кола заштићена аутоматским прекидачима или осигурачима називне струје 10–20 А, чија је улога да искључе напајање уколико се догоди дуготрајно струјно преоптерећење, може се сматрати да је оно веома редак узрок пожара у електричним инсталацијама ниског напона. Међутим, проблем настаје ако је електрична компонента неквалитетно израђена и не може да поднесе своју, од произвођача декларисану, називну струју. Пракса у нашој земљи је показала да се на тржишту могу наћи неквалитетне електричне компоненте (нпр. продужни каблови непознатог порекла, који се, иако декларисани за називну струју од 16 А, прегревају и пале при знатно мањим струјним оптерећењима).

1.2.2.2 Додатна топлотна изолација

До прегревања проводника може доћи и при називним струјним оптерећењима, уколико се спречи нормално одвођење топлоте, тј. уколико се повећа топлотна изолација (што се, на пример, може остварити намотавањем проводника у клупко или постављањем неког облика спољне топлотне изолације). Лабораторијском демонстрацијом је показано да се енергетски кабл може запалити у току нормалног рада уколико се смота у клупко и прекрије одећом [6]. Нажалост, овакве ситуације су честе у стамбеним и пословним објектима у нашој земљи (слика 6).



Слика 6. Пример неадекватно постављеног продужног кабла и термовизијски снимак који се односи на проводник смотан у клупко

1.2.2.3 „Лутајуће“ струје и земљоспојеви

Под „лутајућим струјама“ се подразумевају електричне струје које се, услед квара на неком делу електричне инсталације (нпр. услед земљоспоја), појаве у проводним деловима у којима нису очекиване. Такви проводни делови могу се озбиљно прегрејати, чиме се стварају услови за настанак пожара.

Земљоспојеви настају при додиру огољеног дела фазног проводника са металним предметом (металним кровом, металним мердевинама или другим металним конструкцијама), услед чега температура проводника, а посебно оствареног контакта, знатно расте, чак и при струјама квара мале јачине. На слици 7 су приказана два дела истог проводника (означена словима *A* и *B*), истопљеног и прекинутог услед пробоја његове изолације и појаве земљоспоја преко кућишта разводног ормана [18]. Види се да је осталим проводницима такође изгорела изолација услед пожара, али се нису истопили, што јасно указује на то да је управо истопљени проводник изазвао пожар у разводном орману, који се убрзо

проширио на цео пословни објекат. У случајевима када су струјна кола заштићена помоћу заштитних уређаја диференцијалне струје (такозваних *FID* склопки), напајање места квара се у случају појаве земљоспоја веома брзо искључује, па је вероватноћа настанка пожара знатно смањена [21].



Слика 7. Последице земљоспоја којим је проузрокован велики пожар у једном пословном објекту [18]

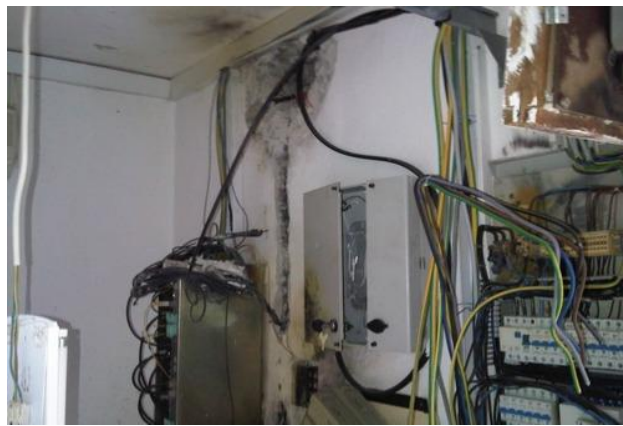
1.2.2.4 Пораст напона изнад називне вредности

Пораст напона изнад називне вредности представља редак узрок паљења електричних инсталација. Изолациони материјали који се користе за проводнике и остале компоненте електричне инсталације способни су да издрже мања повећања напона, која су редован догађај у електроенергетским инсталацијама. Ипак, појава паљења је могућа уколико се напон повећа услед:

1. удара грома,
2. квара у преносно-дистрибутивном систему, при коме се нисконапонска електрична инсталација директно изложи знатно већем напону, и
3. прекида неутралног проводника.

Познато је да удар грома може да проузрокује паљење не само електричних инсталација већ и свих врста запаљивих материјала. Прилично често се дешава да у руралним подручјима током невремена праћеног ударима грома дође до пожара који најчешће изазивају тоталну материјалну штету (ватрогасне екипе обично у оваква подручја стижу са закашњењем већим од једног сата). Прегледом великог броја извештаја са вештачења пожара насталих у нашој земљи, утврђено је да је најчешћи иницијални узрок пожара пренапон атмосферског порекла, настао у

току невремена са евидентираним пражњењима у надземну нисконапонску мрежу или у неки објекат у њеној близини. Ово потврђују и подаци добијени од електродистрибутивних предузећа. У одсуству одводника пренапона на стубу, пренапонски талас преко надземне нисконапонске мреже и кабла кућног прикључка продире у објекат, где изазива почетно оштећење изолације у делу мерно-разводног ормана (са осигурачима и бројилом). Пример оштећења електричне инсталације услед продора пренапонског таласа приказан је на слици 8.



Слика 8. Пример оштећења електричне инсталације услед продора пренапонског таласа

Узрок настанка пожара је појава струја кратких спојева које настају као последица оштећења изолације иницираних атмосферским пренапоном, услед чега долази до локалних прегревања и паљења електричне инсталације. Важно је напоменути да овакве струје нису благовремено прекинуте због технички неодговарајућег степеновања заштите (непоштовања принципа селективности), односно због одсуства адекватних стубних осигурача чију функцију нису успешно могли да преузму нисконапонски високоучински осигурачи инсталирани у трансформаторској станици.

Кварови у преносно-дистрибутивном систему при којима се нисконапонска електрична инсталација директно повезује на високи напон веома се ретко дешавају. За разлику од њих, прекид неутралног проводника није ретка појава. Уколико је у разводном орману (разводној табли) неутрални проводник у прекиду, на крајевима пријемника се може појавити напон близак линијском напону (вредност напона је у том случају одређена импедансама посматраног и осталих укључених пријемника у свим струјним колима која се напајају из тог

разводног ормана (разводне табле) [16,21]). Посебно је опасна ситуација када се на линијском напону, а услед прекида неутралног проводника, нађе неки од укључених пријемника мале снаге и велике импедансе, као што су, на пример, електронски уређаји (ТВ, радио-пријемник, рачунар...). Уколико је напон на прикључцима оваквих пријемника знатно већи од називног, најчешће долази до пробоја изолације који може да изазове пожар на пријемнику. Уколико је реч о термичком пријемнику, струја пријемника ће бити већа од називне и проузроковати прегревање које може да запали пријемник. Како је и у овом случају изолација пријемника изложена повећаном термичком и диелектричном напрезању, постоји могућност њеног електричног пробоја. Паљења и пожари на електричним инсталацијама у оваквим околностима уопште нису изненађење.

1.2.2.5 Лоши електрични контакти

Уколико електрични контакт није добро изведен (није мале отпорности), временом може да прерасте у прогресивни квар. Спој постаје лабавији, слој оксида на контакту има мању проводност, појављују се локална електрична микропражњења у контакту и отпорност на месту контакта расте, услед чега се дисипација снаге на њему повећава, а температура наставља да расте. У одређеном тренутку температура лошег контакта довољно порасте да се створе услови за паљење запаљивих материјала у његовој непосредној околини (најчешће *PVC* изолације).

Лоши контакти (који су главни узрок великог омског загревања компоненти електричне инсталације [6]), и редни електрични лук (који најчешће настаје на локацији лошег електричног контакта) представљају најопасније кварове (са највећим вероватноћама да изазову пожар), зато што их не детектује ниједна класична заштитна компонента (осигурач, аутоматски прекидач, заштитни уређај диференцијалне струје...) [21–23]. Лошим контактом у електричној инсталацији назива се онај контакт код кога је повећана контактна отпорност услед редукције момента затезања завртња (лабав контакт), смањења ефективне површине контакта (непотпуног преклапања металних елемената који остварују контакт), повећаног слоја оксида на површинама контакта (који настаје услед старења контакта или убрзаног процеса деградације услед корозије) или

појаве слоја страних честица (запрљан контакт). Контактна отпорност, као показатељ степена „погоршања“ контакта, расте са порастом сваког од наведених фактора (лабавост, смањење ефективне површине, старост, корозија, запрљаност).

Уколико електрични контакт није добро изведен (уколико има повећану контактну отпорност), он временом може да прерасте у прогресивни квар. Процес често има особине нестабилне позитивне повратне спреге. Последица велике отпорности контакта је локално загревање, услед чега се поспешује процес оксидације контакта и врши микропомерање његових делова [6]. Услед тога се повећава дисипација енергије на контакту (Џулов ефекат) и температура наставља да расте. Она расте све док се на месту лошег контакта не успостави термодинамичка равнотежа, тј. док се не изједначе снага топлоте генерисане на контакту и укупна снага одвођења топлоте са контакта (струјањем, провођењем и зрачењем). Пошто је реч о релативно ниским температурама, снага одвођења топлоте зрачењем са места контакта може се занемарити (изузев случаја усијаног контакта температуре преко 700 °C).

Струја кроз контакт генерише топлотну снагу (снагу Џулових губитака) која се изражава следећом формулом:

$$P_k = R_k \cdot I^2, \quad (1)$$

у којој је P_k – снага генерисана на контакту, R_k – контактна (прелазна) отпорност и I – јачина струје кроз контакт.

Струја кроз контакт директно зависи од називне снаге (P_n) пријемника који је прикључен на струјно коло у коме се контакт налази.

Топлотна снага P_k која се генерише на контакту са њега се одводи провођењем кроз чврсте елементе у његовој околини (проводници, „бананица“ утикача, „гнездо“ утичнице, електроизолациони материјали...).

Пренос површинске топлотне снаге P_p провођењем кроз напред наведене чврсте елементе може се представити помоћу формуле:

$$P_p = -\lambda \cdot grad \vartheta, \quad (2)$$

у којој су:

ϑ – просторна расподела температуре унутар чврстог тела, и λ (W/mK) – коефицијент топлотне проводности конструктивног елемента.

Даљи пренос топлотне енергије се одвија струјањем – топлотна енергија прелази у расхладни флуид (најчешће ваздух). Топлотна снага преноса топлоте

струјањем са контакта и конструктивних елемената у његовој околини одређена је следећим изразом:

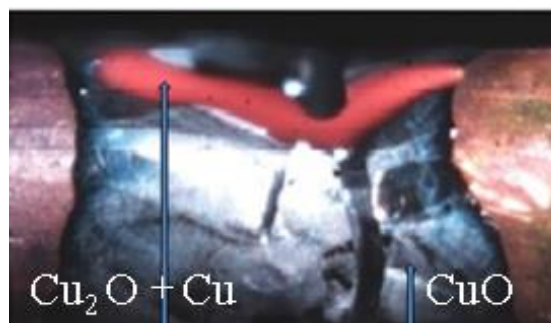
$$P_s = \int_S \alpha \cdot (\vartheta - \vartheta_0) dS, \quad (3)$$

у коме су:

α (W/m²K) – коефицијент преласка топлоте са чврстог тела на флуид, ϑ – температура микроповршине (dS) са које се топлота предаје флуиду (ваздуху), ϑ_0 – температура флуида (ваздуха) помоћу кога се одводи топлота (температура амбијента), и S – укупна спољна површина контакта и конструктивних елемената у његовој околини.

На основу израза (2) и (3) може да се закључи да ће се повећавањем температуре контакта, а самим тим и повећавањем температуре конструктивних елемената у његовој околини, повећавати и укупна снага којом се топлота са контакта и блиских конструктивних елемената предаје расхладном флуиду. Пораст температуре контакта се зауставља када снага одвођења топлоте са контакта и конструктивних елемената у његовој околини (P_s) постане једнака топлотној снази P_k која се генерише на контакту, односно када се успостави термодинамичка равнотежа. Место у контакту које по успостављању термодинамичке равнотеже има највећу температуру (ϑ_{max}) термилошки се означава као „врела“ тачка (*hot spot*) контакта.

На месту на коме се између два метална проводника појави лош електрични контакт после краћег или дужег временског периода, а у зависности од јачине струје, температуре споја и материјала који формирају електрични контакт, формираће се тзв. мост састављен од метала и металних оксида. На слици 9 је приказан пример моста формираног на лошем контакту прекинутог бакарног проводника.



Слика 9. Пример процеса формирања моста на месту прекида бакарног проводника [24]

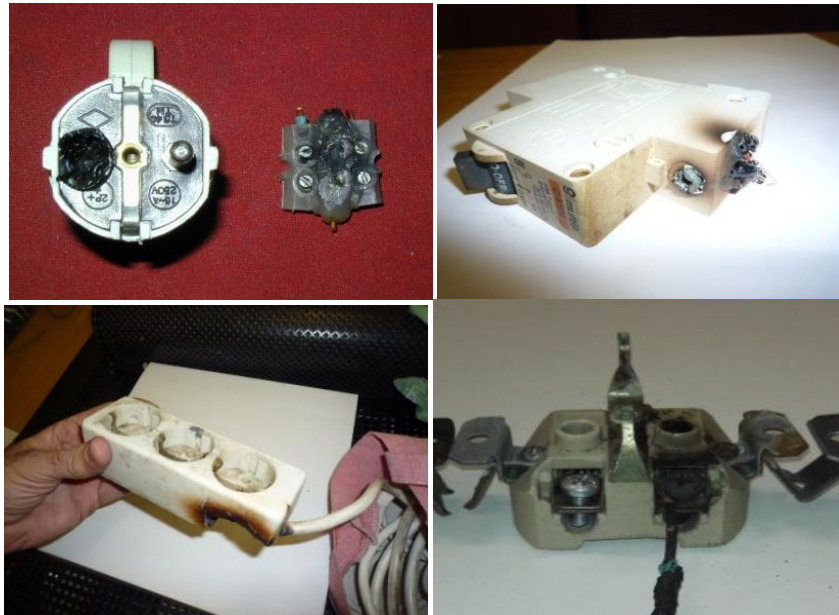
Проводни део моста са слике 9 формиран је од смеше атома бакра и слоја Cu_2O који има полупроводничка својства, док је непроводни део моста формиран од слабо проводног једињења CuO . Струја кроз повећану отпорност суженог проводног канала изазива повећање температуре до тачке топљења полупроводничког слоја Cu_2O (око $1230\text{ }^\circ\text{C}$), када се на месту прекинутог проводног канала успоставља електрични лук [24].

Подешавањем јачине струје на олабављеном контакту бакар–бакар уочено је да се на њему приближно 15 W дисипира при струји јачине 1 A , а око 25 W при струји јачине $2,5\text{ A}$. Анализом површине контакта помоћу X -зрака утврђено је да је велика отпорност на лошем споју бакар–бакар последица прогресивног формирања слоја Cu_2O , који представља диелектрик мале проводности. [6]

Наизменична струја у контакту и повећање температуре поспешују процес стварања метал-оксида на површинама оба дела контакта. Када су два метала раздвојена слојем метал-оксида, прикључени напон може да изазове локалне електричне пробоје у њему. Оваква микропражњења локално повећавају температуру контакта, која у неким тачкама може достићи вредност температуре топљења метал-оксида (типична температура топлих тачака контакта Cu-Cu споја је око $1250\text{ }^\circ\text{C}$, док, сходно напред реченом, температура топљења Cu_2O износи око $1230\text{ }^\circ\text{C}$). Кроз слој метал-оксида се његовим топљењем стварају метални мостови без нечистоћа, мале отпорности. У њима се успоставља струја велике јачине, због чега се убрзо прегревају, топе и распадају. Уколико је струја довољне јачине, процес је самоодржив због високе температуре, јер се наставља оксидација метала, чиме се надокнађује количина метал-оксида претворена топљењем у чист метал. [6]

Услед описаног процеса, отпорност контакта се циклично мења између високе и ниске вредности. При струји јачине 1 A , на растојању 10 mm од контакта у коме се одиграва поменути процес, регистроване су температуре $200\text{--}350\text{ }^\circ\text{C}$, довољне да изазову паљење запаљивих материјала. У струјним колима са струјом јачине 20 A снага дисипације на лошем контакту, услед описаног процеса, износи $20\text{--}40\text{ W}$, а на добром контакту само $0,08\text{--}0,2\text{ W}$ [6]. Примећено је да су челични завртњи подложнији описаном процесу од месинганих. Примери оштећења електричних компоненти (утикача, прикључне стезалке, аутоматског прекидача,

продужног кабла и утичнице), до којих је дошло услед појаве лошег електричног контакта, приказани су на слици 10.



Слика 10. Примери оштећених електроинсталационих компоненти услед лошег електричног контакта [25]

Услед загревања лошег електричног контакта може доћи до паљења:

- предмета од материјала малог топлотног капацитета (постелине, завесе, прекривачи, јастуци...), који су постављени директно уз лош контакт (снага дисипације потребна за паљење је око 28 W),
- пластичних делова електроинсталационих компоненти (снага дисипације потребна за паљење је око 30 W), и
- дрвених конструкција и предмета (снага дисипације потребна за паљење је 35–50 W). [6]

1.2.3 Спољашње загревање

У већини случајева спољашњег загревања проводници и остале компоненте електричне инсталације представљају жртву, а не узрок пожара, јер се електрични лук у многим случајевима јавља као последица деградације изолационог материјала и јонизације околног ваздуха, узрокованих спољашњим загревањем. Експерименти су показали да се квар (кратак спој) на електричним проводницима изолованим умреженим полиетиленом дешава на температури од око 270 °С, а на

проводницима са *PVC* изолацијом и *PVC* омотачем на 250 °C [6]. Сличан квар се може десити и у светилкама у пословним објектима, које су предвиђене за рад на температури мањој од 60 °C. У оквиру експеримента [6], таква светиљка је загрејана до 202–205 °C. Квар на електричној инсталацији се појавио за мање од 65 сати непрекидног рада на тој температури. Изолација проводника је постала крта, ломила се и отпадала са проводника, што је довело до кратког споја.

1.2.4 Комбиновани кварови

Пожар углавном настаје комбинацијом више описаних узрока. Већина пожара узрокованих кваром на електричној инсталацији настаје тако што прво дође до прегревања компоненте, које је потом праћено варничењем, а на крају и паљењем. На пример, проводник се може прегрејати услед струјног преоптерећења или постојања лошег електричног контакта. Прегревање временом може да смањи диелектричну чврстоћу изолације проводника, услед чега може доћи до појаве кратког споја на местима на којима је проводник савијен или прелази преко метала.

Комбиновани ефекат настанка пожара најбоље се уочава на лошем споју утикач–утичница, поготово код термичких пријемника велике снаге који су подвргнути честим укључењима и искључењима, услед чега се временом додатно троши контактни материјал и ствара лош контакт који локално загрева *PVC* изолацију. На крају процеса деградације метала и изолације јавиће се лош електрични контакт који прелази у редни електрични лук, способан да изазове почетни пожар на споју утикач–утичница. Кораци који воде ка паљењу услед лошег споја утикач–утичница су следећи:

1. струјно преоптерећење и лоши контакти узрокују загревање проводника и локални пораст температуре,
2. долази до термичке деградације *PVC* изолације,
3. долази до ослобађање корозивног HCl гаса из *PVC* изолације,
4. долази до упијања влаге услед хигроскопске активности калцијум-карбонатне испуне кабла,
5. долази до појаве иницијалних површинских и унутрашњих варничења,

6. формирају се угљенисане путање на површини и у унутрашњости *PVC* изолације,
7. долази до појаве електричног лука коме је претходило знатно локално прегревање лошег електричног контакта, и на крају
8. долази до паљења *PVC* изолације или локалног запаљивог материјала [6].

Вероватноћа избијања пожара се повећава ако, осим електричних, постоје и механички поремећаји у електричној инсталацији. Експериментима спроведеним у Норвешкој [20] утврђено је да се температура доброг споја утикач–утичница, у тачкама контакта, при називним струјним оптерећењима стабилизује на око 60 °С. Међутим, када је у току рада са називним струјним оптерећењем спој утикач–утичница био изложен slabим вибрацијама, температура у тачкама контакта је за кратко време порасла на 400–450 °С, што је изазвало топљење околног изолационог материјала у непосредној близини „бананице“ утикача и „гнезда“ утичнице, а затим је уследила и појава редног електричног лука.

Систематична истраживања настанка пожара услед кварова на електричним инсталацијама су неопходна како би се развиле погодне методологије превентивних прегледа и одржавања електричних инсталација са циљем да се овакви кварови на време спрече. На основу изложеног прегледа свих значајнијих кварова на електричним инсталацијама који могу бити узрок пожара, може се закључити да су два типа квара – прегревање лошег електричног контакта и редни електрични лук – критични са аспекта изазивања пожара, зато што их ниједна класична заштитна компонента не детектује. Треба нагласити да се највећа пажња изложеној проблематици посвећује у САД, где је 2002. године патентиран уређај који детектује редни електрични лук и у случају његове појаве искључује напајање струјног кола. Уз то, законом је прописана његова обавезна уградња у разводне табле у становима. Како у нашој земљи број стамбених, пословних и јавних објеката, као и укупан број електричних пријемника у њима, непрекидно расте, повећава се и број локација на којима може доћи до пожара узрокованог кваром на електричној инсталацији. Ако се томе дода чињеница да се на нашем тржишту електричних компоненти појављују неквалитетни производи, чије се електричне карактеристике не подударују са декларисаним, као и да велики број неовлашћених лица врши извођење, поправке и преправке

електричних инсталација и пријемника, може се закључити да је вероватноћа настанка пожара услед кварова на електричним инсталацијама у нашој земљи већа него у земљама у којима постоји и поштује се адекватна законска регулатива.

1.3 Класичне заштитне компоненте

Улога заштитних електричних компоненти је да у појединим деловима електричних инсталација ограниче струју или напон. Све оне, осим топљивог осигурача, у свом саставу имају прекидач, који отварањем контакта прекида напајање места квара и одваја штићени од преосталог дела електричних инсталација [16].

1.3.1 Топљиви осигурач

Топљиви осигурач је једина заштитна компонента која превелику струју прекида самостално. То је постигнуто помоћу посебно конструисаног топљивог уметка. Код топљивог уметка се у затвореном простору, одвојеном од околине зидом израђеним од температурно постојане керамике, налази посебно обликован електропроводни део, чија је површинска густина струје знатно повећана у односу на ону која карактерише електропроводне делове изван њега. Због тога се тај део више загрева и достиже више температуре. Простор између керамичког зида и тог електропроводног дела испуњен је финозрнстим кварцним песком. Називна струја топљивог уметка дефинисана је на сличан начин као код пријемника и проводника, с том разликом што је овде гранична дозвољена температура одређена температуром топљења тог посебно израђеног електропроводног дела, а не издржљивошћу електроизолационог материјала. Ако би вредност струје кроз топљиви уметак постала већа од његове називне вредности, температура његовог електропроводног дела могла би да порасте изнад граничне вредности, услед чега би се тај део истопио, прекидајући ток струје у струјном колу.

Постоје две врсте топљивих осигурача: нискоучински, који садрже брзе или троме топљиве уметке, и високоучински, чији умети имају завршетке у виду „ножева“. Напоменимо да топљиви умети имају временски зависну струјну карактеристику, без могућности подешавања називне вредности. Ако је добро

изабран, осигурач са топљивим уметком представља заштиту струјног кола или разводног вода и од кратког споја и од преоптерећења [16].

1.3.2 Биметално заштитно реле

Биметално заштитно реле је израђено од биметалног споја образованог од метала различитих коефицијената дилатације, кроз који „протиче“ струја која га загрева. Тај спој се уголико више извија уколико је већа достигнута температура, која зависи како од јачине струје тако и од дужине њеног трајања. Поред врха споја који се извија поставља се полуга, чије се почетно растојање од споја може подешавати. Струја која после довољно дуго времена доведе до извијања споја управо за дужину почетног растојања представља називну струју биметалног релеа. Ако је извијање биметалног споја веће од почетног растојања, долази до померања полуге, које се преноси или на контакт прекидача (тзв. микропрекидача) или на окидач затегнуте опруге у неком прекидачу. Јасно је да се променом почетног растојања мења и вредност називне струје биметалног релеа, што омогућава његову примену као заштитне компоненте од преоптерећења. Биметално реле може бити израђено као самостална компонента, или се користи као функционални део аутоматског или заштитног прекидача [16].

1.3.3 Прекострујно реле

Прекострујно реле је заштитна компонента која има функцију заштите од струје кратког споја, а састављена је од електромагнета и покретне полуге затегнуте опругом. Сила електромагнета, која је пропорционална јачини струје кроз њега, повлачи полугу, а супротставља јој се сила опруге, која је пропорционална померају опруге учињеном при њеном затезању. Када надвлада сила електромагнета, доћи ће до тренутног помераја полуге. То значи да ће ово реле имати временски независну струјну карактеристику и могућност подешавања струје реаговања [16]. И код прекострујног релеа се померај полуге може пренети на контакт „микропрекидача“ или на окидач затегнуте опруге у неком прекидачу.

1.3.4 Аутоматски и заштитни прекидач

Аутоматски прекидач је електроинсталациона компонента састављена од биметалног и прекострујног релеа чије се називне струје не могу подешавати. У

референци [16] детаљно је описана ова заштитна компонента. Постоје четири типа аутоматских прекидача који се разликују по карактеристикама окидања: *A*, *B*, *C* и *D*. У стамбеним, пословним и јавним објектима најчешће су заступљени аутоматски прекидачи карактеристике окидања *B* и *C*. Аутоматски прекидачи са карактеристиком окидања *B* користе се за заштиту струјних кола на која се прикључују фиксни пријемници (акумулациони бојлер, кварцна грејалица, извори светлости...), као и у струјним колима са шуко-утичницама опште намене. У новије време се често уместо осигурача са брзим топљивим уметцима уграђују аутоматски прекидачи са карактеристиком окидања *B*. Аутоматски прекидачи са карактеристиком окидања *C* користе се за заштиту струјних кола на која су прикључени пријемници са неповољним полазним карактеристикама (нпр. асинхрони мотори са краткоспојеним ротором), због чега су добра замена за топљиве осигураче са тромим уметцима. Аутоматски прекидачи карактеристика окидања *A* и *D* су специјалне намене и немају широку примену. Аутоматски прекидачи представљају поуздану заштитну компоненту и у случају појаве кратког споја и у случају настанка преоптерећења у струјном колу.

Основне предности аутоматског прекидача у односу на осигурач са топљивим уметком су [16]:

- не садржи топљиви уметак, а уколико је одреаговао, довољно је да се подигне полуга и његови контакти се поново затварају, и
- не постоји могућност да се делови под напоном додирну (израђен је од електроизолационог материјала).

Када се прекидачу са опругом додају биметално и прекострујно реле чије се називне струје могу подешавати, добија се заштитни прекидач. Он се састоји од једнополног, двополног или трополног прекидача са опругом затегнутом при његовом затварању. Полуга биметалног или прекострујног релеа делује на окидач опруге, која тада отвара контакте прекидача.

1.3.5 Заштитни уређај диференцијалне струје (ЗУДС)

За ову заштитну компоненту код нас је одомаћен назив *FID* (*Fault Isolation Detection*) склопка. На слици 11 је дат изглед трофазног ЗУДС-а. ЗУДС треба трајно да поднесе струју мању од његове називне струје и да делује (искључи

струјно коло) при појави диференцијалне струје (струје „цурења“) веће од његове струје реаговања. Заштитни проводник води се директно ка пријемнику (без прикључивања на ЗУДС).



Слика 11. Физички изглед трофазног ЗУДС-а

При нормалном функционисању инсталације, векторски (фазорски) збир струја у проводницима који су провучени кроз магнетско језгро ЗУДС-а једнак је нули. Ако настане квар, нпр. спој фазног проводника и металног кућишта пријемника, нарушава се „равнотежа“ струја (струја квара, која „пролази“ кроз одговарајући фазни проводник, не „враћа“ се кроз неутрални, него кроз заштитни проводник). Уколико је струја квара (земљоспоја) већа од струје реаговања ЗУДС-а, отварају се контакти прекидача и он прекида напајање дела електричне инсталације у коме је дошло до квара. Више детаља о принципу рада ЗУДС-а који се, правилно изабран, примењује као ефикасна заштита од земљоспоја може се наћи у [16].

ЗУДС поседује тастер за тестирање, помоћу кога се проверава његова функционалност. Када се притисне тастер, део струје фазног проводника се не враћа кроз неутрални проводник који је провучен кроз језгро, чиме се намерно ремети „равнотежа“ струја и ЗУДС реагује.

Обични конвенционални ЗУДС једино реагује у случају синусоидалних струја квара. Последњих година, а услед масовне употребе електронских компоненти у појединим пријемницима, указала се потреба за оваквим конвенционалним уређајима нове генерације, који успешно прекидају не само синусоидалне, него и несинусоидалне наизменичне и пулсирајуће једносмерне струје квара [16].

Лош електрични контакт или редни електрични лук могу се јавити на било ком месту струјног кола, од разводне табле до пријемника. Струја на месту ових кварова не може бити већа од струје оптерећења, јер је ограничена оптерећењем и отпорношћу електричног лука или лошег електричног контакта. Из кратког прегледа класичних заштитних компоненти може се закључити да оне не представљају ефикасну заштиту од појаве лошег електричног контакта или редног електричног лука. Јасно је да ни ЗУДС не може да штити електричну инсталацију од редног електричног лука, јер његова појава не ремети „равнотежу“ струја. Евентуално, ЗУДС може да представља заштиту од паралелног електричног лука насталог између фазног и заштитног проводника уколико нема велику интермитентност (прекидност).

1.4 Примена технике термовизијског снимања

У [26] је представљена проблематика детекције кварова на нисконапонским електричним инсталацијама који се не могу открити у оквиру периодичних верификација применом метода и техника прописаних стандардима, нити их класичне заштитне компоненте (аутоматски прекидачи и осигурачи са топлљивим уметком) могу препознати. Због тога се на местима настанка оваквих „невидљивих“ кварова (лошег контакта, односно редног електричног лука) стварају услови за настанак пожара. Кварови на које не реагује ниједна компонента класичног система заштите електричних инсталација веома су опасни, јер остају неоткривени све док не направе материјалну штету (пожар или хаварију на инсталацијама или опреми). Преглед термовизијском камером омогућава проналажење делова електричних инсталација чија температура значајно одудара од очекиваних радних температура електричних компоненти („врелих“ тачака). У табели 6 су дате највеће дозвољене температуре за различите типове електричне изолације. Проналажењем „врелих“ тачака омогућава се циљано одржавање, односно санирање проблема пре него што дође до пожара или хаварије у систему.

Табела 6. Највеће дозвољене температуре за различите типове електричне изолације [27]

| Тип изолације | Највећа дозвољена температура |
|--|-------------------------------|
| <i>PVC</i> и природна гума | 70 °C на проводнику |
| Умрежени полиетилен и етил-пропилен | 90 °C на проводнику |
| Минерална (са <i>PVC</i> омотачем или металним плаштом када се каблови додирују) | 70 °C на омотачу |
| Минерална (са металним плаштом и када се каблови не додирују) | 105 °C на изолацији |

Применом термовизијске камере могу се рано детектовати лоши електрични контакти, пре свега они у разводним орманима, јер су визуелно доступни инфрацрвеном сензору камере.

Периодичне верификације нисконапонских електричних инсталација предвиђене су стандардом [27] и Правилником [28]. Такве верификације подразумевају визуелни преглед и испитивања електричним мерењима. Визуелним прегледом се уочавају недостаци на електричној инсталацији до којих је дошло током њене употребе. Испитивање електричним мерењима обухвата мерење отпорности петље квара и отпорности изолације, проверу непрекидности заштитних проводника и проводника за главно и локално изједначење потенцијала, као и проверу функционалности заштитног уређаја диференцијалне струје. Наведена мерења се, пре свега, врше због провере ефикасности система заштите у случају квара, и то аутоматским искључењем напајања (провера заштите од електричног удара). У случају да се појаве кварови попут кратког споја или дуготрајног преоптерећења, аутоматски прекидач или топлјиви уметак осигурача сигурно ће прекинути напајање струјног кола пре него што се било шта упали. Међутим, класичним заштитним компонентама и стандардним прегледима нисконапонских електричних инсталација не могу да се детектују кварови као што је лош контакт, односно редни електрични лук. Пошто појаву лошег контакта у електричној инсталацији прати повећање температуре на месту његовог настанка, треба се залагати за увођење превентивних периодичних термовизијских прегледа електричних инсталација [21].

На елементима електричне инсталације временом долази до микропомераја (услед вибрација, ширења проводника на високој температури, крућења површинског слоја оксида), који доводе до слабљења контакта између проводника

и прикључног елемента (папучице, стезаљке, клеме) на електроинсталационој компоненти. На ослабљеним контактима може доћи до прегревања, чиме се формирају тзв. „вреле“ тачке. Уколико температура „вреле“ тачке премаши вредност трајно дозвољене температуре електричне изолације проводника, која зависи од типа изолације (табела 6), прво долази до деградације њених изолационих својстава, а затим, при високој температури, и до њеног топљења и паљења.

На слици 12 се може видети термички оштећена *PVC* изолација проводника на месту лабавог контакта на прикључку шуко-утичнице изведеном помоћу завртња.



Слика 12. Термички оштећена *PVC* изолација на прикључку шуко-утичнице (максимална температура на месту контакта износила је преко 700 °C)

Уколико је на електричној инсталацији дошло до дуготрајног преоптерећења проводника, могу се појавити тзв. „вреле“ линије, док у случају дуготрајних преоптерећења електричних компоненти може доћи и до појаве тзв. „врелих“ површина. Применом термовизијске камере „вреле“ тачке, линије и површине могу се на време детектовати. Снимање термовизијском камером се врши под називним оптерећењем електричне инсталације (уколико је то могуће остварити), како би се активирале потенцијалне „вреле“ тачке, линије и површине [25].

1.4.1 Значај термовизијског прегледа

Сврха термовизијског прегледа је да се на време идентификују и документују неправилности у раду електричне опреме у објекту. У електричним инсталацијама, прекомерна загревања су најчешће узрокована лабавим или

оштећеним везама, кратким спојевима, преоптерећењем, несиметричним оптерећењем или неисправним, неусаглашеним или неправилно инсталираним компонентама. Термографер мора имати довољно знања о електроинсталационим компонентама, али и о преносу топлоте (топлотном зрачењу и преносу топлоте струјањем и провођењем).

Корисник објекта у коме се врши термовизијски преглед треба да обезбеди квалификовано (стручно) лице које добро познаје електричне инсталације и опрему у објекту, а овлашћено је да приступи свим електричним системима, као и да пружи све неопходне податке о електричној опреми и инсталацијама и да помогне да се сви делови електроенергетских инсталација прегледају логичним и ефикасним редоследом. Током прегледа, квалификовано лице треба да омогући термограферу приступ електричној опреми (уклањање поклопаца, заштитних баријера...), да обезбеди да опрема буде под адекватним оптерећењем довољно дуго, као и да врши додатна мерења на захтев термографера (нпр. мерење електричног оптерећења). Након завршеног мерења треба да врати у првобитно стање све уклоњене баријере и поклопце. Квалификовано лице корисника објекта има пуну одговорност за последице које су проузроковане нереаговањем на резултате добијене термовизијским снимањем од стране термографера (информације добијене на месту испитивања, а које указују на опасну ситуацију коју треба одмах отклонити).

1.4.2 Процедура термовизијске инспекције

Пожељно је да електроинсталационе компоненте које треба да се термовизијски прегледају буду под називним оптерећењем. Предметне разводне табле и ормане у којима су смештене електроинсталационе компоненте треба прво визуелно прегледати споља пре отварања или уклањања заштитних поклопаца како би се утврдиле могуће нерегуларности. Ако се утврди прегревање и/или неко небезбедно стање (нпр. отворени и руком приступачни делови инсталације под напоном), корисник објекта, односно квалификовано лице, треба да предузме одговарајуће корективне мере пре започињања термовизијског снимања. Кућишта разводних ормана морају се у потпуности отворати како би се обезбедио директан приступ деловима електроинсталационих компоненти

смештених у њима. У неким случајевима пре термовизијског снимања неопходно је да се демонтирају изолационе баријере (најчешће израђене од пертинакса), прозирне пластичне плоче (најчешће израђене од плексигласа), као и друге препреке које спречавају пренос инфрацрвеног зрачења. Приликом термовизијског снимања потребно је водити рачуна о томе да се све електроинсталационе компоненте могу адекватно видети: у целости или сваки њихов саставни део посебно. Када се врши квалитативна термовизијска инспекција, термографер треба да користи мануелно подешавање фокуса на термовизијској камери како би се обезбедило добијање јасне (оштре) слике електроинсталационих компоненти које су предмет испитивања. Приликом извођења квантитативне термовизијске инспекције, термографер треба да уложи максималне напоре да обезбеди што већу тачност бесконтактног мерења температуре. Конкретно, потребно је што приближније (тачније) подесити коефицијент емисивности материјала од којег је израђена испитивана опрема (произвођачи термовизијских камера обично препоручују да се за електроинсталационе компоненте узима коефицијент емисивности 0,95) и рефлектовану температуру (температуру окружења у коме се налази испитивана опрема) [29], као и извршити корекцију резултата мерења ако је оно обављено под неким углом и са различитих растојања. Термографер треба да изврши снимање свих електроинсталационих компоненти са инвентарске листе коју треба да обезбеди корисник објекта. Кад год је то могуће, резултате добијене термовизијским снимањем сличних електричних компоненти под сличним оптерећењем треба међусобно упоредити. Уколико се том приликом детектују необичне разлике у температури, такву појаву треба документовати помоћу термовизијске слике и обичне фотографије. Ако се у току вршења термовизијског снимања уоче значајна прегревања електроинсталационих компоненти, препорука је да се открију узроци њиховог настанка и одмах покрене акција за отклањање кварова који су их изазвали (електричар треба да изврши притезање завртања на прикључним елементима компоненти, замени оштећене компоненте, по потреби растерети струјна кола итд.).

1.4.3 Документација о термовизијском снимању

Термографер треба да обезбеди документацију за све термовизијске прегледе. У стручном налазу који се предаје кориснику објекта где су извршена испитивања треба да буду укључени следећи подаци [29–31]:

1. подаци о термограферима (фирма, имена и презимена термографера, њихове квалификације и степен стручности),
2. подаци о кориснику објекта (назив и адреса),
3. имена квалификованих (стручних) лица корисника објекта која су помагала термограферима за време термовизијског снимања,
4. произвођач, модел и серијски број сваке употребљене термовизијске камере (опционо, калибрациони лист),
5. списак разводних ормана и друге електричне опреме која је термовизијски прегледана, као и списак опреме са пописне листе инвентара која није прегледана (са навођењем објашњења зашто преглед није извршен – нпр. опрема није била оптерећена, није био обезбеђен приступ опреми), и
6. датум извршеног термовизијског прегледа, као и датум издавања стручног налаза.

Када врши квалитативну термовизијску контролу, термографер треба да обезбеди следеће информације за сваки од идентификованих недостатака [29–31]:

1. тачну локацију на којој су уочени недостаци (позиција разводног ормана, ознака разводног ормана, локација електроинсталационе компоненте итд.),
2. опис електроинсталационе компоненте на којој је уочен недостатак (ознака компоненте, струјно коло, називни напон, оптерећење компоненте приликом снимања итд.),
3. термовизијске слике и обичне фотографије електроинсталационе компоненте на којој је уочен недостатак (оне се у извештају позиционирају што ближе једна другој, једна поред друге), у папирној форми, и
4. све остале информације које могу битно утицати на доношење закључка о извршеном термовизијском прегледу (на пример, тумачење узрока настанка квара који је изазвао прегревање, као и коментари квалификованог стручњака корисника објекта, уколико постоје).

Када врши квантитативну термовизијску контролу, термографер треба да обезбеди следеће додатне информације за сваки напред документован недостатак [29-31]:

1. удаљеност сензора термовизијске камере од предмета снимања када је извршено детектовање недостатка на електроинсталационој компоненти или електричној опреми,
2. информацију о проценту оптерећења за електроинсталациону компоненту на којој је уочен недостатак (израчунава се дељењем стварног оптерећења у тренутку снимања са називним оптерећењем компоненте),
3. податке о подешеном коефицијенту емисивности, рефлектованој температури, као и вредности подешеног коефицијента трансмисије на камери,
4. податке о температури површине компоненте са уоченим недостатком, дефинисану референтну температуру, као и њихову температурну разлику (пораств), у случајевима када се користе ΔT критеријуми [29],
5. податке о референтној температури површине компоненте са уоченим недостатком и граничној стандардној дозвољеној температури за ту врсту компоненте, у случајевима када се користе критеријуми апсолутне температуре [29],
6. процену опасности услед утврђеног пораста температуре електроинсталационе компоненте или електричне опреме, и
7. оцену приоритета за отклањање квара и елиминацију уочене нерегуларности на електроинсталационој компоненти, која се заснива на субјективној процени термографера и ΔT критеријуму или критеријуму апсолутне температуре.

1.4.4 ΔT критеријуми за одлучивање

Да би проценио опасност у зависности од измерене температуре електроинсталационе компоненте, термографер може користити критеријум ΔT (температурне разлике). Критеријум температурне разлике је заснован на порасту температуре анализираних компоненти у односу на температуру која је дефинисана као референтна: то је обично температура околног амбијента, температура сличне компоненте која је оптерећена под сличним условима, или максимална прописана (гранично дозвољена) температура електроинсталационе компоненте. У табели 7

су дати ΔT критеријуми за процену стања електроинсталационих компоненти, као и приоритети за отклањање недостатака.

Табела 7. ΔT критеријум за процену стања електроинсталационих компоненти [30]

| Приоритети за отклањање недостатака | ΔT између електроинсталационих компоненти истог типа које су под сличним оптерећењем | ΔT у односу на температуру амбијента | Препоручена акција |
|-------------------------------------|--|--|--|
| 4 | 1–3 °C | 1–10 °C | Наставити са редовним периодичним контролама, није потребна детаљна истрага |
| 3 | 4–10 °C | 11–20 °C | Указује на могући недостатак; у краћем временском периоду, уколико је могуће, треба уочити и отклонити недостатак – дефект |
| 2 | 11–15 °C | 21–40 °C | Обавезно надгледање док се не отклони детектовани недостатак – дефект |
| 1 | > 15 °C | > 40 °C | Упозоравајуће одступање, одмах отклонити недостатак (извршити поправку) |

1.4.5 Примена критеријума апсолутне температуре за електроинсталационе компоненте

Термографер може да користи критеријум апсолутне температуре за идентификацију (уочавање) електроинсталационих компоненти са недозвољено високим порастом температуре. Примери максимално дозвољених температура (изражених у Целзијусовим степенима) наведени су у табели 8, у којој су температуре представљене на следећи начин: амбијентална температура / пораст температуре / максимално дозвољена температура (амбијентална температура + пораст температуре = максимално дозвољена температура).

Када се једновремено термовизијски снимом загревање неколико електроинсталационих компоненти, користиће се подаци за максимално дозвољену температуру за компоненту за коју је она најнижа (конзервативан приступ). Када термографер не може да одреди класу електричне изолације

опреме или проводника (каблова) који се термовизијски снимају, он треба да користи критеријум апсолутне температуре за класу изолације чија је максимално дозвољена температура најнижа. Осим ако није другачије наведено, критеријум апсолутне температуре важи за опрему и компоненте које раде на наведеној температури амбијента и под 100% називним оптерећењем. Следећа формула се може применити како би се добила коригована максимална дозвољена температура ($T_{\text{макс.кор.}}$) за оптерећења компоненти која су мања од називног, као и за стварну температуру амбијента на којој се налазила компонента приликом вршења термовизијског снимања:

$$T_{\text{макс.кор.}} = \left[(I_{\text{мер.}}/I_{\text{ном.}})^2 \right] \cdot T_{\text{пораст темп.}} + T_{\text{изм.амб.}}, \quad (4)$$

у којој су:

$I_{\text{мер.}}$ – измерене или процењена струја оптерећења електричне компоненте,

$I_{\text{ном.}}$ – називна струја електроинсталационе компоненте,

$T_{\text{пораст темп.}}$ – дозвољени пораст температуре за анализирану електроинсталациону компоненту, и

$T_{\text{изм.амб.}}$ – измерена температура амбијента на локацији инсталиране компоненте.

Табела 8. Критеријум апсолутне температуре са примерима електроинсталационих компоненти и електричне опреме [30]

| Електроинсталационе компоненте и опрема | Амбијентална температура ($T_{\text{амб.}}$) | Пораст температуре ($T_{\text{пораст темп.}}$) | Максимално дозвољена температура ($T_{\text{макс}}$) |
|--|--|--|--|
| PVC изолација | 30 | 45 | 75 |
| Силиконска гума | 30 | 95 | 125 |
| Електрични контакт (бакар, легура бакра, алуминијум) | 40 | 50 | 90 |
| Аутоматски прекидач | 40 | 30 | 70 |
| Осигурач са топљивим уметком | 40 | 30 | 70 |

1.4.6 Примери из праксе

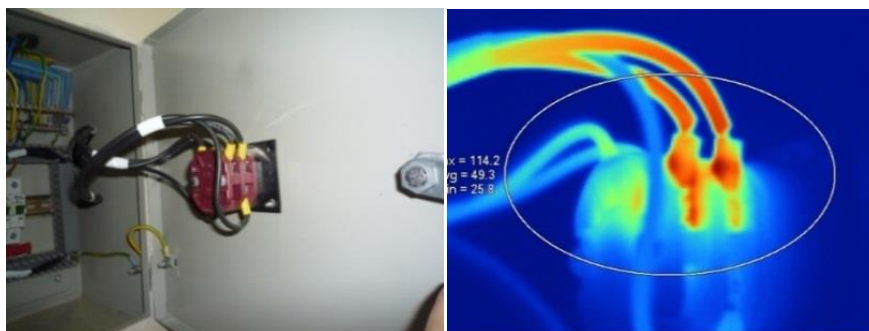
У [31] су представљени примери детекције лошег електричног контакта применом технике термовизијског снимања. На термовизијском снимку приказаном на слици 13 анализиран је главни прекидач разводне табле са које се електричном енергијом напајају три рефлектора, сваки снаге 1200 W. На

термовизијском снимку се јасно види „врела“ тачка на једној од активних фазних стезаљки, чија је температура око $107\text{ }^{\circ}\text{C}$, иако је она била максимално затегнута (максимално дозвољена температура за *PVC* изолацију је $70\text{ }^{\circ}\text{C}$). Међутим, функционалном провером стања стезаљке утврђено је да је она била механички оштећена, због чега се чвршћа веза од тренутно постојеће није могла остварити. Због тога је прекинуто напајање електричном енергијом и извршена замена стезаљке.



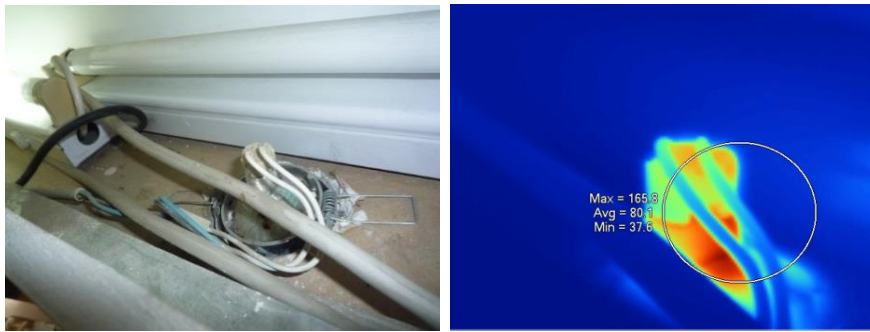
Слика 13. „Врела“ тачка на једној од стезаљки фазног проводника

Приликом термовизијског прегледа разводне табле са које се у пекари електричном енергијом напајају пећнице, „вреле“ тачке температуре око $114\text{ }^{\circ}\text{C}$ пронађене су на гребенастом главном прекидачу разводне табле (слика 14).



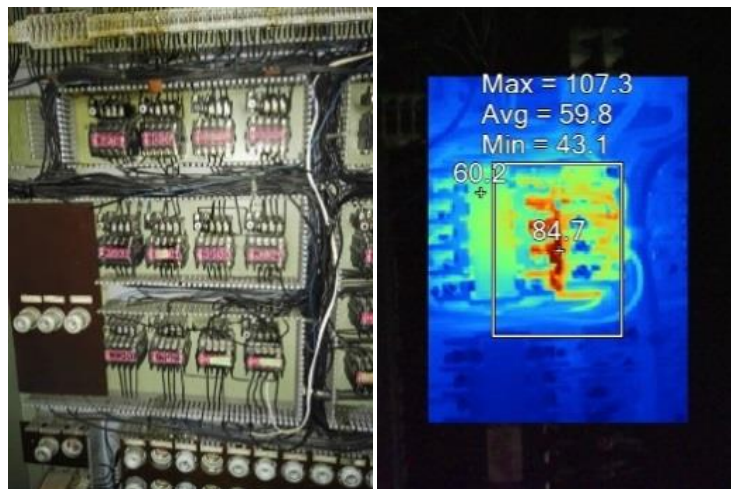
Слика 14. Прегревање контаката гребенастог прекидача

Приликом превентивног периодичног прегледа инсталације осветљења, „вреле“ тачке су пронађене на ламперији у којој су биле уграђене светиљке са халогеним изворима светлости. Тада је примећено оштећење напојног кабла флуо извора светлости који је додиривао вреле прикључке халогеног извора светлости (слика 15).



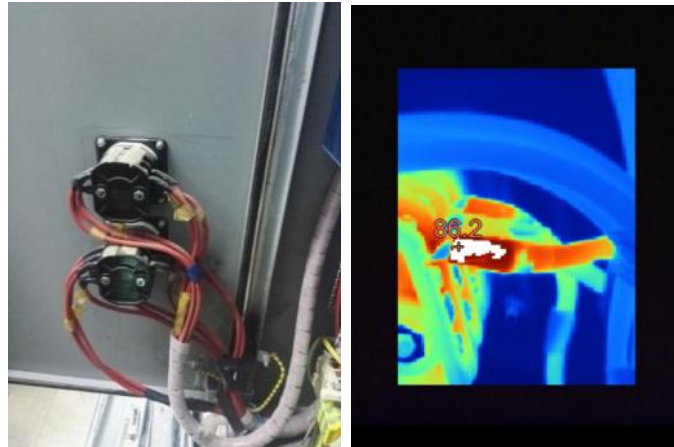
Слика 15. Термовизијски преглед халогеног извора светлости уграђеног у ламперију

Следећи пример потиче од прегледа разводног ормана вентилације у топлотној подстаници. Детектовано је да су температуре контаката једног контактора у разводном орману достигле температуру преко 100 °C (слика 16). Реч је о старом и дотрајалом контактору. Пошто се ситуација ни после притезања контаката није битно променила, препоручена је замена контактора новим, одговарајућих карактеристика.



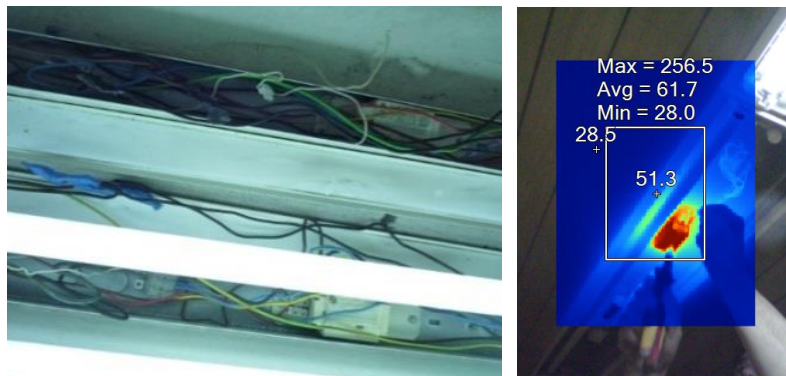
Слика 16. Термовизијска слика дотрајалог контактора

Следећи пример (слика 17) показује како је термовизијском провером разводног ормана пронађена „врела“ тачка (температуре преко 85 °C) на главном прекидачу у разводном орману који напаја електричном енергијом сервер салу једног рачунског центра, због чега је било потребно да се настали квар што пре отклони. Квар није могао да се отклони притезањем контакта на главном прекидачу, јер је лош електрични контакт настао у унутрашњости прекидача, због чега је он хитно морао да се замени новим.



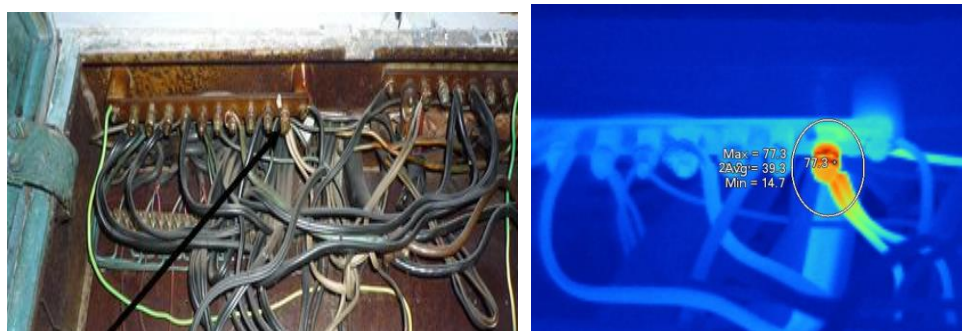
Слика 17. Проблем са прегрејаним прекидачем у разводном орману сервер сале једног рачуноског центра

Пример прегрејаног баласта (електромагнетске пригушнице) светиљке са флуо изворима светлости може да се види на слици 18. Максимална измерена температура достигала је 256 °С.



Слика 18. Прегревавање електромагнетске пригушнице у светиљци са флуо цевима

Пример детекције „вреле“ тачке на лошем електричном контакту у разводном орману на сабирници (једном завртњу) приказан је на слици 19.



Слика 19. Пример термографијског снимка на коме се види „врела“ тачка на сабирници

У свим напред наведеним примерима, за детектоване „вреле“ тачке термографер је, поштујући критеријум ΔT и/или критеријум апсолутне температуре, донео одлуку да квалификовано лице корисника објекта (у пракси је то најчешће електричар) одмах отклони квар. У највећем броју случајева опасност је отклоњена дотезањем шрафова (завртња) на електроинсталационим компонентама, док је у појединим случајевима морало да се прекине напајање електричном енергијом како би се стара компонента са трајно оштећеним контактима заменила новом (ни у једном од тих случајева лош електрични контакт није могао бити отклоњен једноставним притезањем завртња).

1.5 Савремене заштитне компоненте за детекцију редног електричног лука

Данас су на тржишту заступљене две заштитне компоненте чија је основна улога да се у струјном колу спречи одржавање нежељеног редног електричног лука. У САД је око 20 година у примени *AFCI* (*Arc Fault Circuit Interrupter*) компонента, док се на европском тржишту пре пет година појавила *AFDD* (*Arc Fault Detection Device*) компонента исте намене.

1.5.1 *AFCI* компонента

Вештачењем авионских несрећа у САД насталих услед пожара на електричним инсталацијама у авиону установљено је да је редни електрични лук био главни узрок оваквих пожара. Због тога су прва испитивања на пољу детекције редног електричног лука извршена у авио-индустрији у САД. Први патенти су били засновани на звучној и светлосној детекцији редног електричног лука. Због неефикасности оваквих система, која се огледала у делимичној заштити струјног кола, истраживања су усмерена ка проналаску компоненте која треба да детектује и искључи редни електрични лук који се појавио било где у струјном колу, од разводног ормана до пријемника. Због заштите патента, у то време (средина деведесетих година прошлог века) говорило се да се принцип рада нове компоненте заснива на „памотној“ електроници. Временом су сличне компоненте почеле да се користе и у нисконапонским електричним инсталацијама

у зградама. На слици 20 је приказан изглед данашњег *AFCI* прекидача (на слици лево је приказан обичан *AFCI* прекидач, а на слици десно комбиновани тип *AFCI* прекидача). Обичан *AFCI* прекидач се инсталира у разводни орман уместо стандардног аутоматског прекидача и представља како заштиту од редног електричног лука тако и од струја кратког споја и преоптерећења. За разлику од обичног, комбиновани тип *AFCI* прекидача поседује и коло за детекцију земљоспоја (као и ЗУДС).



Слика 20. *AFCI* прекидачи: лево – обичан, десно – комбиновани тип

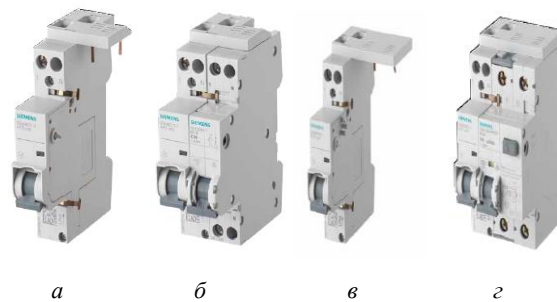
AFCI прекидач може да препозна опасан редни електрични лук изазван кваром у електричној инсталацији и, у случају његове појаве, искључи напајање струјног кола. Да не би долазило до лажних реаговања, *AFCI* прекидач препознаје електрични лук настао у нормалном режиму рада електричних компоненти и пријемника (прекидача, лучних упалача, комутаторских мотора, итд.), као и струју појединих електронских пријемника која је по свом таласном облику слична струји електричног лука (нпр. струја микроталасне пећи, струја компакт флуо извора светлости, струја LED извора светлости ...). Пре него што је *AFCI* почео да се употребљава у стамбеним јединицама у САД, морао је да задовољи захтеве бројних тестова који су гарантовали његов поуздан рад [32].

Америчким националним електричним стандардом (*National Electrical Code, NEC*), који је 1999. године донела америчка асоцијација за заштиту од пожара (*NFPA*), прописано је да се свако монофазно струјно коло са заштитном компонентом називне струје 15 А или 20 А (називни напон износи 120 V, мрежна учестаност 60 Hz), чији се пријемници налазе у спаваћим собама, мора заштитити *AFCI* прекидачем (ова одлука је ступила на снагу 1. јануара 2002). Иста организација је 2005. године донела пропис по коме од 1. јануара 2008. нови тип

AFCI прекидача (*Combination Type AFCI*) мора да се угради у сва струјна кола новосаграђених стамбених објеката код којих називна струја заштитне компоненте износи 15 А или 20 А [33]. Такође, у САД је прописана обавеза произвођача клима-уређаја да уз њих испоручују и *AFCI* прекидач типа *Plug Cap*, који обезбеђује заштиту струјног кола клима-уређаја од нежељене појаве редног електричног лука (одлука је ступила на снагу 1. августа 2004. године).

1.5.2 *AFDD* компонента

AFDD компонента (произвођач *Siemens*) намењена је систему напајања 230 V, 50 Hz, са струјом до 16 А. Састоји се од *AFD* јединице и додатне заштитне компоненте (аутоматски прекидач (једнополни или двополни) или ЗУДС) [34]. Напоменимо да се варијанта са двополним аутоматским прекидачем користи у системима у којима је неопходно приликом квара остварити и прекидање неутралног проводника. Наведена компонента обезбеђује заштиту од кратког споја, преоптерећења, пренапона и електричног лука, због чега је струјно коло у потпуности заштићено. На слици 21 је приказан спољни изглед *5SM6 AFD* јединице, која се комбинује или са аутоматским прекидачем или са ЗУДС-ом.



Слика 21. Заштитне *5SM6 AFDD* компоненте а) и б) без и са аутоматским прекидачем, в) и г) без и са ЗУДС-ом

Пошто је *AFDD* компонента намењена европском тржишту, њој је овде посвећено више пажње.

1.5.3 *AFD* јединица

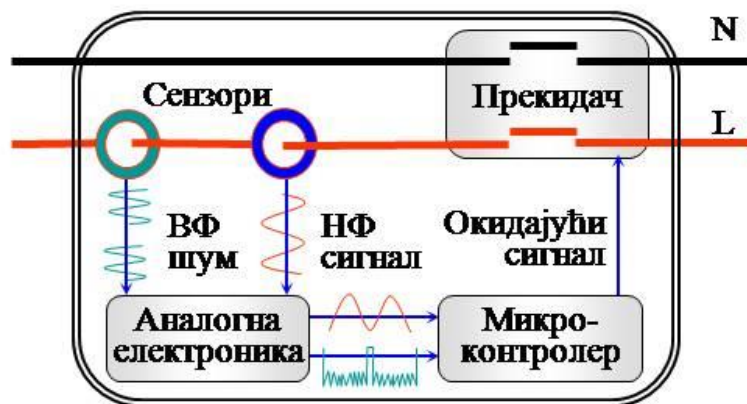
На слици 22 је приказана принципијелна шема *5SM6 AFDD* компоненте (комбинација *AFD* јединице и двополног аутоматског прекидача). Сви активни проводници – у овом случају фазни (означен са *L*) и неутрални проводник

(означен са N) – пролазе кроз AFD јединицу. Фазни проводник пролази кроз два одвојена сензора:

- струјни сензор за откривање нискофреквентних спектралних компоненти струјног сигнала, и
- ВФ сензор за откривање високофреквентних спектралних компоненти струјног сигнала.

Аналогна електроника припрема струјне сигнале за обраду у микроконтролеру, који помоћу одговарајућих алгоритама препознаје карактеристике које су својствене појављивању редног електричног лука који настаје као последица квара.

AFD јединица је механички спрегнута са прекидачким механизмом двополног аутоматског прекидача, чијим се окидањем струјно коло у коме се појавио редни електрични лук искључује са мрежног напајања. Уколико је дошло до детекције редног електричног лука, после реаговања аутоматског прекидача на предњој страни кућишта AFD јединице пали се и гаси жута LED лампица.



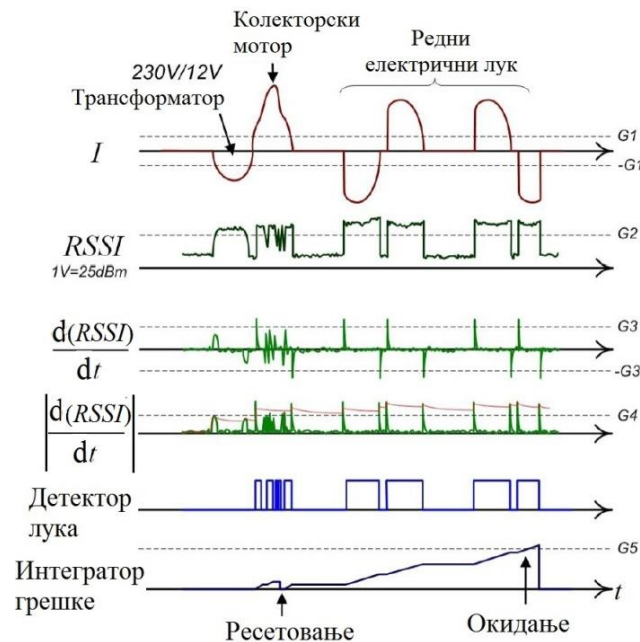
Слика 22. Принципијелна (блок) шема $AFDD$ -а

1.5.4 Откривање редног електричног лука

Око 80% свих прорачуна које извршава микроконтролер „отпада“ на детекцију редног електричног лука (остатак од 20% прорачуна односи се на детекцију паралелног електричног лука). Детекција редног електричног лука се базира на анализи сигнала (*Received Signal Strength Indication – RSSI*), односно на одређивању нивоа снаге свих спектралних компоненти сигнала чије се учестаности налазе у опсегу 30 kHz до 300 GHz. Анализа се заснива на

испитивању брзих промена у сигналу $RSSI$, јер ће тада апсолутна вредност извода овог сигнала, $d(RSSI)/dt$, имати генерисане пикове (видети слику 23). Управо се ти пикови користе за детекцију редног електричног лука, и то у случају када се јављају у близини проласка струје кроз нулу.

Алгоритам AFD -а закључује да је дошло до појаве редног електричног лука у струјном колу уколико вредност интеграла сигнала „детектор лука“ (видети слику 23) премаши дефинисану вредност $G5$. Поред овог услова користи се допунски критеријум који спречава лажно реаговање заштитног уређаја, а заснован је на анализи високофреквентног шума у струји пријемника у опсегу 22–24 MHz. Уколико су оба услова задовољена, микроконтролер шаље окидачки сигнал аутоматском прекидачу.



Слика 23. Алгоритам обраде сигнала на основу које се детектује редни електрични лук [34]

Два услова морају једновремено да буду задовољена да би се формирао сигнал „детектор лука“:

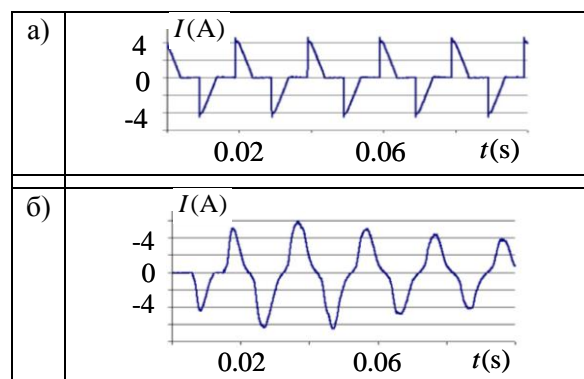
1. у неком тренутку (блиском тренутку проласка струје кроз нулу) апсолутна вредност извода сигнала $RSSI$ премашила је граничну вредност $G4$ (посматрају се само тренуци у којима се вредност струје налази између $-G1$ и $G1$),
2. вредност сигнала $RSSI$ мора бити већа од дефинисане граничне вредности $G2$ (за разлику од претходног, овај услов се проверава све време између два проласка струје кроз нулу).

Да би се избегла искључења струјног кола у случајевима у којима није успостављен редни електрични лук, *AFD* јединица мора да направи разлику између струјног сигнала редног електричног лука и струјних сигнала који, на пример, потичу од нормалног рада колекторских мотора у коме се јављају варнице на четкицама колектора.

Појава радних варнице на колектору мотора у *RSSI* сигналу изазива вишеструке промене између два проласка струје кроз нулу (видети пример на слици 23). Када настану овакве промене у *RSSI* сигналу, при чему је претходно испуњен услов бр. 1, долази до вишеструке појаве сигнала „детектор лука“ између два проласка струје кроз нулу, што се користи као критеријум за ресетовање интегратора сигнала „детектор лука“, чиме се онемогућава слање окидачког сигнала аутоматском прекидачу.

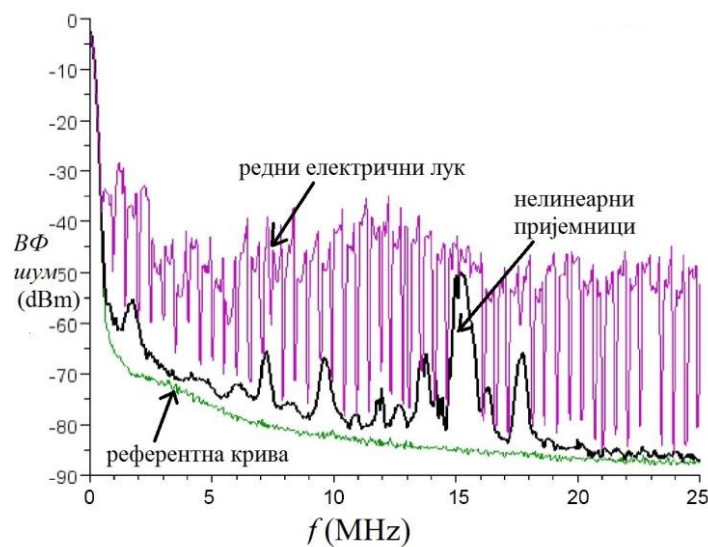
1.5.5 Заштита од нежељеног окидања

На слици 24 су приказани примери таласних облика струја електричних пријемника које садрже спектралне компоненте веома сличне онима које се појављују за време горења редног електричног лука [34]. Ова сличност је нарочито изражена у случају пријемника који садрже колекторске моторе код којих се јавља варнице између четкица и колектора, као и код пријемника који садрже регулаторе светлосног флуksа или јединице напајања у енергетској електроници (исправљачи, инвертори, фазни регулатори итд.).



Слика 24. Електрични пријемници са спектром сличном спектру редног електричног лука
а) регулатор светлосног флуksа
б) бушилица са колекторским мотором

Поузданост деловања *AFDD*-а за детекцију редног електричног лука знатно је повећана анализом високофреквентних електричних шума који настају како радом нелинеарних пријемника тако и горењем редног електричног лука. На слици 25 се могу видети значајне вредности електричног шума у струји нелинеарних пријемника у фреквентном опсегу 15–18 MHz, док се у фреквентном опсегу 22–24 MHz јавља само шум који потиче од струје редног електричног лука. *AFD* јединица управо скенирањем шума у опсегу 22–24 MHz проверава допунски критеријум као потврду за појаву редног електричног лука.



Слика 25. Позадински електрични шум нелинеарних пријемника и шум настао од редног електричног лука

1.5.6 Дијаграм самотестирања *AFDD* компоненте

Треба истаћи да *5SM6 AFDD* компонента има опцију самотестирања функционалности (блок шема је приказана на слици 26).



Слика 26. Дијаграм самотестирања *AFDD*-а

Самотестирање се аутоматски покреће на сваких 13 сати да би се проверила исправност *AFD* јединице. Софтвер микроконтролера производи вештачке високофреквентне електричне шумове и струјне сигнале који одговарају сигнаlima код појаве редног електричног лука. Ови сигнали се помоћу посебног електронског кола убацују иза ВФ сензора, односно струјног сензора, и анализирају од стране аналогног електронског кола и микроконтролера. Као доказ исправности *AFD* јединице очекује се да микроконтролер изда окидачку команду. Слање окидачког сигнала аутоматском прекидачу је у току теста онемогућено како би се избегло стварно окидање *AFDD* компоненте за време самотестирања. Након успешно обављеног самотестирања *AFD* јединице, стварни окидачки сигнал поново може да активира аутоматски прекидач. У случају да се добије негативан резултат самотестирања, *AFDD* компонента ће се тренутно искључити (тада електричар треба да изврши њену замену). Циклус самотестирања ће бити одложен уколико су се појавили почетни знаци настанка стварног редног електричног лука или уколико је дошло до појаве струјног преоптерећења.

1.5.7 Поређење ефикасности заштитних компоненти

Како би се упоредиле предности савремених заштитних компоненти (*AFDD* на европском тржишту и *AFCI* на америчком тржишту) у односу на класичне заштитне компоненте (топљиви уметак, аутоматски прекидач, *FID*

склопка...), у табели 9 је дат преглед свих могућих кварова у нисконапонским електричним инсталацијама и које заштитне компоненте могу ефикасно да их препознају и искључе струјно коло.

Табела 9. Преглед кварова и заштитних компоненти које их ефикасно детектују

| Редни број | Врста квара у нисконапонским електричним инсталацијама | Могућност детекције квара помоћу заштитне компоненте |
|------------|--|--|
| 1 | Кратак спој (метални), фаза-фаза | Аутоматски прекидач и топлјиви уметак, <i>AFDD (AFCI)</i> |
| 2 | Кратак спој (метални), фаза-нула | Аутоматски прекидач и топлјиви уметак, <i>AFDD (AFCI)</i> |
| 3 | Преоптерећење | Аутоматски прекидач, топлјиви уметак, <i>AFDD (AFCI)</i> |
| 4 | Кратак спој (метални), фаза-изложени електропроводни део (кућиште) | Аутоматски прекидач и топлјиви уметак, ЗУДС (<i>FID</i> склопка), <i>AFDD (AFCI)</i> |
| 5 | Кратак спој, фаза-изложени електропроводни део (преко стабилног паралелног електричног лука) | Аутоматски прекидач и топлјиви уметак (могу да одреагују недовољно брзо, најчешће ефикасније у <i>TN</i> него у <i>TT</i> систему заштите), ЗУДС, <i>AFDD (AFCI)</i> |
| 6 | Кратак спој, фаза-изложени електропроводни део (преко прекидног (интермитентног) паралелног електричног лука – варничење | Аутоматски прекидач и топлјиви уметак (мала је вероватноћа да уопште одреагују), ЗУДС (већа је вероватноћа да ефикасно одреагује у <i>TN</i> него у <i>TT</i> систему заштите), <i>AFDD (AFCI)</i> |
| 7 | Паралелан стабилан електрични лук (фаза-фаза) | Аутоматски прекидач и топлјиви уметак, <i>AFDD (AFCI)</i> |
| 8 | Паралелан стабилан електрични лук (фаза-нула, нула-заштитни проводник) | Аутоматски прекидач и топлјиви уметак, <i>AFDD (AFCI)</i> |
| 9 | Паралелан прекидни (интермитентни) електрични лук (фаза-фаза) – варничење | Аутоматски прекидач и топлјиви уметак (мала вероватноћа да одреагују), <i>AFDD (AFCI)</i> |
| 10 | Паралелан прекидни (интермитентни) електрични лук (фаза-нула, нула-заштитни проводник) – варничење | Аутоматски прекидач и топлјиви уметак (мала вероватноћа да одреагују), <i>AFDD (AFCI)</i> |
| 11 | Редни електрични лук – стабилан (на фазном, неутралном или заштитном проводнику) | <i>AFDD (AFCI)</i> |
| 12 | Редни електрични лук – нестабилан (на фазном, неутралном или заштитном проводнику) | <i>AFDD (AFCI)</i> |
| 13 | ЛОШ ЕЛЕКТРИЧНИ КОНТАКТ | НЕМА ДЕТЕКЦИЈЕ! |

Анализом података представљених у табели 9 може се извести једноставан закључак да постојеће заштитне компоненте не могу да пруже заштиту од лошег

електричног контакта. Савремене заштитне компоненте пружају поуздану заштиту од свих осталих врста кварова.

1.6 Регулатива која се односи на верификацију квалитета нисконапонских електричних инсталација

Један од основних докумената који, између осталог, дефинише област верификације квалитета нисконапонских електричних инсталација је Правилник о техничким нормативима за електричне инсталације ниског напона [28]. Њиме се прописују:

- својства и карактеристике уређаја и опреме за извођење електричних инсталација,
- услови и захтеви који морају бити испуњени при извођењу и коришћењу електричне инсталације,
- означавање и обележавање уређаја, опреме и електричних инсталација који утичу на безбедност и заштиту живота и здравља при коришћењу електричне инсталације,
- техничке мере заштите при коришћењу електричне инсталације,
- поступак и начин контролисања и верификације прописаних својстава, карактеристика и квалитета електричних инсталација.

За област која се обрађује у оквиру ове докторске дисертације од посебног интереса је део наведеног правилника који се односи на поступак и начин контролисања и верификације прописаних својстава, карактеристика и квалитета електричних инсталација. У члану 189. Правилника наглашено је следеће: „Свака електрична инсталација мора током постављања и/или када је завршена, али пре предаје кориснику, бити прегледана и испитана у складу са одредбама овог правилника.“ У члану 191 је наведено: „Ако се електрична инсталација мења, мора се проверити и испитати да ли је измењена инсталација у складу са одредбама овог правилника.“

Према овом правилнику, разликују се:

- провера визуелним прегледом, и
- испитивање електричних инсталација електричним мерењима.

1.6.1 Провера визуелним прегледом

Провера визуелним прегледом [28] врши се када је електрична инсталација у безнапонском стању, а састоји се у провери:

- заштите од електричног удара, која укључује мерење безбедносних размака када је заштита изведена препрекама, кућиштима, преградама или постављањем опреме ван дохвата руке,
- исправности избора заштитних компоненти и уређаја,
- препознавања фазних, неутралног и заштитног проводника,
- постојања електричних шема и таблица са упозорењима у разводним орманима,
- препознавања струјних кола, осигурача, прекидача, стезалки и друге опреме, и
- спојева проводника у разводним кутијама, разводним орманима итд.

1.6.2 Испитивање електричних инсталација електричним мерењима

Испитивање електричних инсталација електричним мерењима подразумева [28]:

- проверу непрекидности заштитног проводника и проводника за изједначење потенцијала,
- проверу електричне отпорности изолације електричне инсталације,
- проверу заштите одвајањем електричне инсталације,
- проверу ефикасности система заштите аутоматским искључењем напајања, и
- проверу допунског изједначења потенцијала.

Пошто су напред наведени правилник и пратећи стандарди веома застарели (стари више око три деценије), Институт за стандардизацију Србије издао је стандард [27], који се односи управо на прегледе и испитивања електричних инсталација. Напоменимо и да Нацрт новог правилника о техничким захтевима за електричне инсталације ниског напона годинама чека на усвајање, а он се по питању верификације квалитета нисконапонских електричних инсталација управо позива на (нови) стандард [27].

Стандард [27] одређује захтеве који се односе на почетну и периодичне верификације квалитета нисконапонских електричних инсталација. У првом делу Стандарда дефинисани су захтеви који се односе на почетну верификацију електричних инсталација визуелним прегледом и електричним мерењима, као и начин извештавања о резултатима почетне верификације. Почетна верификација се изводи након комплетирања нове инсталације или комплетирања допуна или измена у постојећој инсталацији. У другом делу Стандарда дефинисани су захтеви који се односе на периодичне верификације електричних инсталација (како би се утврдило да ли су сви њени елементи у задовољавајућем стању за даљу употребу), као и начин извештавања о резултатима сваке периодичне верификације.

1.6.3 Почетна верификација квалитета нисконапонских електричних инсталација

Визуелни преглед електричних инсталација приликом њихове почетне верификације уобичајено се врши у безнапонском стању и увек претходи испитивању електричних инсталација електричним мерењима. Преглед се мора обавити да би се утврдило да ли је електрична опрема која је део фиксне инсталације [27]:

- у складу са захтевима за безбедност из одговарајућих стандарда за опрему,
- исправно изабрана и постављена према *IEC 60364* и упутствима произвођача,
- видљиво оштећена толико да би могла да угрози безбедност корисника објекта.

Прегледом мора да се провери и следеће (у ситуацијама у којима је то релевантно):

- системи заштите од електричног удара,
- присуство противпожарних преграда и осталих мера предострожности за спречавање брзог ширења пожара,
- избор проводника према максималној трајно дозвољеној струји и паду напона,
- избор и подешавање заштитних уређаја и уређаја за надгледање,

- присуство и исправност положаја одговарајућих уређаја за растављање и расклапање,
- избор опреме и заштитних мера у зависности од спољашњих утицаја,
- идентификација неутралних и заштитних проводника,
- присуство шема, упозоравајућих обавештења и слично,
- идентификација струјних кола, уређаја за заштиту од прекомерних струја, прекидача, прикључака итд.,
- присуство заштитних проводника, укључујући и проводнике главног и допунског изједначења потенцијала,
- приступачност опреми (разводним орманима, прекидачима и сл.).

Приликом испитивања електричних инсталација електричним мерењима мерни инструменти (методе мерења) морају задовољавати стандард *IEC 61557*. Испитивање електричних инсталација пожељно је извршити по следећем редоследу [27]:

- непрекидност заштитних проводника,
- отпорност изолације електричне инсталације,
- заштита аутоматским прекидањем напајања (мерењем отпорности петље квара, провером називне струје и типа осигурача/аутоматског прекидача, испитивањем заштитног уређаја диференцијалне струје (*FID* склопке), мерењем отпорности уземљивача у *TT* систему заштите итд.),
- испитивање поларитета (врши се тамо где правила забрањују да се у неутрални проводник инсталирају једнополни расклопни уређаји, што значи да се овим испитивањем верификује да су овакви уређаји повезани само у фазним проводницима),
- провера редоследа фаза (за вишефазна кола),
- испитивање функционисања склопова, расклопних блокова, погона, управљачких кола и блокада ради верификације њиховог исправног монтирања, подешавања и инсталирања према захтевима произвођача опреме,
- верификација пада напона (процена мерењем импедансе електричног кола или помоћу одговарајућих дијаграма падова напона у зависности од дужине, попречног пресека и струје оптерећења проводника).

Почетни извештај о верификацији електричних инсталација мора да укључи записе о визуелним прегледима и о резултатима испитивања електричним мерењима. Осим тога, он треба да садржи препоруку за временски интервал између почетне и прве периодичне верификације. У неким државама (али не и код нас), време између почетне и прве периодичне верификације дефинисано је законским или другим националним документима. Извештај морају потписати особе које су овлашћене или компетентне за вршење верификација електричних инсталација.

1.6.4 Периодична верификација квалитета нисконапонских електричних инсталација

Периодична верификација електричних инсталација подразумева њихову детаљну верификацију без демонтаже или са делимичном демонтажом. У оквиру периодичних верификација електричних инсталација спроводи се и одређен број испитивања која се врше и приликом почетне верификације. Сврха периодичне верификације је да осигура:

- безбедност корисника електричних инсталација од ефеката електричног удара и опекотина,
- заштиту од оштећења објекта ватром или топлотом која настаје на местима на којима се појавио квар на електричним инсталацијама,
- потврду да инсталација није оштећена или толико ослабљена да је умањена безбедност корисника, и
- идентификацију кварова на инсталацији и одступања која су настала у односу на почетну верификацију.

Приликом вршења периодичне верификације морају се предузети мере предострожности да не би дошло до појаве опасних ситуација за људе, нити до оштећења прикључене опреме. Мерни инструменти такође морају бити изабрани према релевантним деловима стандарда *IEC 61557*. Свако детектовано оштећење, погоршање или квар мора се навести у извештају. Верификацију могу да врше само стручне и обучене особе.

Учесталост периодичне верификације треба да се одреди пошто се узму у обзир тип електричне инсталације и опреме, услови у којима се она користи,

квалитет одржавања електричних инсталација, као и спољашњи утицаји којима је подвргнута.

У предметном стандарду су дате и следеће напомене: Најдужи интервал између узастопних периодичних верификација може се заснивати на законским или другим националним документима. Приликом вршења прве периодичне верификације може се предложити време вршења следеће периодичне верификације. Интервал између две узастопне периодичне верификације може бити и краћи од пет година када је реч о објектима са повећаним ризиком, као што су:

- радна места на којима постоје повећани ризици од електричног удара, пожара или експлозије,
- радна места на којима постоје и високонапонске и нисконапонске инсталације,
- јавни објекти (школе, болнице, позоришта, тржни центри итд.),
- градилишта итд.

За домаћинства се може одредити дужи период између две верификације (нпр. 10 година).

Након што стручне особе изврше периодичну верификацију, треба да се сачини извештај (стручни налаз), који треба да потпише и овери радна организација која врши периодичну верификацију. Такав документ треба да садржи препоруке за поправке и побољшања, као што су дораде на електричним инсталацијама, а у складу са важећим прописима. Осим тога, извештај мора да садржи и резултате извршених испитивања електричним мерењима, са коментарима.

1.6.5 Преглед домаће и иностране регулативе

Након прегледа доступне домаће и стране литературе [35–45] која се односи на регулативу о испитивањима нисконапонских електричних инсталација (почетна и периодична верификација), могу да се изведу закључци о стању домаће регулативе и њеном (не)усклађеношћу са иностраном регулативом.

Верификацији нисконапонских електричних инсталација у Републици Србији не посвећује се довољна пажња. Тачно је да се оне верификују када су тек

уграђене у објекат (нове инсталације). Међутим, велики проблем представља њихово касније одржавање и одсуство регуларног периодичног испитивања њихове исправности (верификација њиховог квалитета). Након почетне верификације велика већина електричних инсталација више никада не буде подвргнута испитивањима (ово се посебно односи на стамбене објекте). Електричне инсталације временом постају све изложеније настанку кварова који представљају један од најчешћих узрока пожара. То се дешава услед нормалног или убрзаног старења изолације (ако је она изложена неповољним амбијенталним условима – повећаној температури, влаги, корозији итд.), услед микрометарских помераја на местима електричних спојева проводника са стезаљкама, као и услед механичке и електричне „исхабаности“ компоненти електричних инсталација (због разних механичких притисака на проводнике електричних инсталација, електричне преоптерећености проводника итд.). Ово су само неки од главних разлога који указују на потребу за спровођењем периодичних верификација електричних инсталација. На срећу, има наговештаја да ће се ситуација на овом плану побољшати, јер је нови стандард [27] обухватио проблематику периодичних верификација нисконапонских електричних инсталација. Међутим, иако овај документ налаже да се електричне инсталације одржавају у исправном стању и прегледају, ниједан од њих не дефинише максимално трајање интервала између две узастопне верификације. Што се тиче самих тестова које треба обавити приликом периодичне верификације електричних инсталација, они су практично исти са онима који се обављају приликом почетне верификације (са изузетком неких тестова, нпр. испитивања отпорности изолације, које се у пракси веома ретко изводи). Основна испитивања електричних инсталација електричним мерењима која прописују стандард [27] и правилник [28] практично су иста при почетној и периодичној верификацији (провера непрекидности заштитног проводника и проводника за изједначење потенцијала, мерење отпорности петље квара, провера исправности рада заштитног уређаја диференцијалне струје итд.).

На примеру Републике Хрватске може се видети да је и она у потпуности прихватила међународни стандард [27], али и да је отишла корак даље од Србије доношењем Техничког прописа за нисконапонске електричне инсталације (2010. године), у коме су прецизно дефинисани како рокови за периодичне верификације

квалитета нисконапонских електричних инсталација тако и рокови за прве прегледе постојеће (старе) електричне инсталације. Важан податак је да је први пут дефинисан и рок за периодичне верификације електричних инсталација у стамбеним јединицама. Новина је да рокови за периодичне верификације могу бити и краћи од оних који су наведени у Техничком пропису, а прописују их пројектанти електричних инсталација са одговарајућом лиценцом.

Важно је нагласити значај визуелног прегледа нисконапонских електричних инсталација, посебно приликом вршења периодичних верификација, када се очекује да су услед дужег коришћења настале разне нерегуларности на њиховим елементима. Највећу пажњу визуелном прегледу електричних инсталација поклањају у САД, где на тржишту рада и услуга постоји мноштво сервисних организација које могу бити ангажоване да визуелно провере недостатке на електричним инсталацијама, уз обавезу да их одмах и отклоне. Треба истаћи да се регулатива у САД више базира на поштовању прописаних правила приликом извођења нових електричних инсталација и на сертификацији електроинсталационе опреме и пријемника који се уграђују у објектима, него на конкретним тестирањима електричних инсталација. Сертификацију врше независне лабораторије. Добра замисао коју протезира амерички стандард *NFPA 70B-2006* је могућност развоја програма електричног превентивног одржавања (*Electrical Preventive Maintenance – EPM*). Што се тиче термовизијског прегледа електричних инсталација, он није ушао у међународну регулативу (осим у САД где постоје одговарајући стандарди), али га препоручују разни институти (као нпр. у Немачкој) као одличан вид превентивне заштите од настанка пожара на електричним инсталацијама. Један од највећих недостатака поменутих докумената је непостојање адекватне методологије (процедуре) за обављање периодичних верификација која би узела у обзир и лоше електричне контакте, а нарочито одсуство захтева за извођењем термовизијског прегледа. Имајући у виду да се уз помоћ термовизијског прегледа најпоузданије могу открити олабављени или неправилно изведени електрични контакти, који су, у просеку, узрок чак 67% кварова на електричним инсталацијама и опреми [46], јасно је о каквом је методолошком пропусту реч. Последњих година, поготово у развијеним земљама, знатно се повећала свест о исплативости термовизијског снимања. Овакав вид

провере нисконапонских електричних инсталација све више захтевају осигуравајуће компаније, које уговорне обавезе са клијентима одређују и у зависности од постојања извештаја о термовизијском прегледу електричних инсталација у њиховим објектима [46].

Анализом међународне регулативе из предметне области може да се закључи да је она најдетаљније обрађена у британском стандарду *BS 7671:2008* и да се велики број стандарда усвојених у земљама Европске уније ослања управо на њега. Према овом стандарду, учесталост периодичних верификација и тестирања електричних инсталација треба да се одреди на основу типа инсталације и опреме, величине и значаја грађевинског објекта у коме је она инсталирана, квалитета и учесталости њеног одржавања, као и у зависности од спољашњих утицаја којима су изложене електричне инсталације. На основу изнетих утицајних параметара, али узимајући у обзир и старост и запоседнутост објекта, могу се успоставити критеријуми за период верификације нисконапонских електричних инсталација и у Србији. Примери препоручених интервала периодичних верификација квалитета нисконапонских електричних инсталација за разне врсте објеката постоје и у регулативама Аустралије и Министарства одбране Велике Британије [36,39].

Напоменимо да се једино у САД обавезно инсталирају уређаји за откривање редног електричног лука (*AFCI* прекидачи) који настаје као последица неотклоњеног лошег електричног контакта. Такође, у САД постоје стандарди који регулишу област термовизијске контроле електричних инсталација у циљу раног откривања лоших електричних контаката [29,30]. Важан недостатак термовизијског прегледа је што се помоћу њега могу проверити само визуелно доступни електрични контакти (најчешће се врши преглед разводних ормана и табли), који, уз то, морају бити називно оптерећени, док велики број скривених контаката остаје недоступан за детекцију (нпр. у бројним шуко-утичницама, инсталационим разводним кутијама...).

1.7. Преглед публикованих резултата у вези са топлотним ефектима на лошем електричном контакту

Велики број пожара у стамбеним, пословним и јавним објектима изазван је кваровима на старим, неодржаваним, оштећеним или нестручно изведеним електричним инсталацијама [18,47–60]. Поједини кварови (кратки спојеви и преоптерећење) на време се детектују помоћу класичних заштитних компоненти, које, искључујући струјно коло или разводни вод у коме је настао квар, спречавају прегревање и појаву пожара. Међутим, као што је напред објашњено, постоје и кварови, као што су лош електрични контакт и редни електрични лук, при чијој појави класичне заштитне компоненте не реагују (видети поглавље 1.3). Уколико такви кварови трају довољно дуго, могу да се створе услови за настанак пожара [17,21, 23,49,61–66]. Повреде људи, а неретко и губици људских живота, као и велика материјална штета, честа су последица пожара узрокованих оваквим кваровима на електричним компонентама.

Досадашња научностручна истраживања лошег електричног контакта углавном су била усмерена на:

- хемијску анализу структуре материјала на лошем електричном контакту (снимање лошег контакта рентгенским зрацима, микрографија итд.) [67-69],
- мерење температуре лошег контакта и одређивање температуре топљења појединих слојева материјала (на пример, једињења CuO и Cu_2O) [70,71],
- анализу запаљивих гасова ослобођених из *PVC* изолације (гасна хроматографија) [70,71],
- математичко моделовање динамичке отпорности лошег контакта (снимање таласних облика напона и струје на лошем контакту) [68,70,72],
- анализу појаве иницијалног формирања и пораста слоја једињења CuO на месту настанка лошег контакта (експерименти су спроведени за разне комбинације материјала као што су бакар–бакар, бакар–месинг, бакар–челик...) [68,70,72],
- снимање физичког процеса настанка редног електричног лука на лошем контакту и даљих процеса прегревања, паљења и горења околне *PVC* изолације [72,73],

- експериментално праћење процеса настанка пожара када се у близини лошег електричног контакта налази запаљиви материјал [6,67],
- утицај редукције момента затезања завртња на електроинсталационим компонентама на изазивање „врелих“ тачака и могућност настанка пожара [76],
- утицај помераја проводника на месту настанка лошег електричног контакта на брзину нарастања слоја једињења CuO на месту контакта, брзину настанка „врелих“ тачака и електричног лука [76], итд.

Основни недостатак свих напред наведених истраживања је да су експерименти претежно вршени за релативно мале вредности јачине струје (максимално до 5 А) и мале пресеке проводника (око $0,75 \text{ mm}^2$). Пошто је највећи број истраживања реализован у САД (изузев у [67,70]), експерименти су рађени са називним напонем 115 V и мрежном фреквенцијом 60 Hz. За разлику од досадашњих истраживања у којима је значајан број експеримената вршен на намерно изазваним лошим електричним контактима на моделима електроинсталационих компоненти, истраживање у оквиру предметне дисертације садржаће експериментални део са реалним струјама оптерећења, стварним електроинсталационим компонентама и реалним попречним пресецима проводника који се сусрећу у нисконапонским електричним инсталацијама, при називном напону 230 V и мрежној фреквенцији 50 Hz. Такође, у [67,74–76] експерименти су вршени на великом броју шуко-утичница у којима су намерно изазивани лоши електрични контакти, али су истраживања пре свега била намењена форензичарима и вештачењу пожара узрокованих кваром на неком елементу електричне инсталације, због чега нису била усмерена на развој методологија или процедуре за рано откривање лоших електричних контаката у нисконапонским електричним инсталацијама. У досадашњим истраживањима која су рађена у Републици Србији највише пажње је било посвећено термовизијском откривању лоших електричних контаката [77], као и анализи топлотних ефеката на лошем електричном контакту [66].

Садашња сазнања и разумевање механизма кварова на електричним контактима недовољна су да се процени колика би требало да буде површина контакта у било којој врсти споја [78]. Управо због тога се у дисертацији прво анализира лош електрични контакт настао услед непотпуног налегања бакарног

проводника и контактне површине неког елемента (стегаљке, папучице, клеме...) електроинсталационе компоненте. Смањена ефективна површина контакта између бакарног проводника и елемента електроинсталационе компоненте може проузроковати прегревање прикључног места. Као што је наведено у референцама [79] и [80], постоје бројни узроци смањења ефективне површине контакта, који доприносе расту температуре контакта и појави „вреле“ тачке. Најчешћи су:

- оксидација металних делова електричног прикључка (услед корозије, тј. хемијских процеса),
- механичка деформација металних делова електричног контакта,
- топлотна ширења и скупљања металних делова контакта, узрокована променама температуре околине или великим флукуацијама струје,
- присуство вибрација (оне могу да узрокују стварање и прекидање микроконтактне површине на месту споја, што потенцијално доводи до непоправљивих деформација),
- присуство влаге или корозивних гасова у околини електричног контакта (на пример, у случају електричне изолације израђене од *PVC*-а чије прегревање траје довољно дуго, може се појавити хлороводонични гас, који у комбинацији са влагом из атмосфере ствара опасну хлороводоничну киселину, која ће узроковати корозију металних делова електричног контакта), итд.

Термовизија, која графички (на екрану камере) приказује „вреле“ тачке, широко је распрострањена техника која се користи за снимање електричних контаката. Она представља корисну, али и једноставну и ефикасну превентивну меру одржавања електричних инсталација [81]. Међутим, Вилсон и сарадници [82] закључили су да се у раним фазама настанка лоших електричних контаката топлота значајно одводи помоћу хладних металних маса које окружују прегрејано место, што онемогућава да се проблем идентификује на време. Због тога они предлажу да се сваки електрични контакт који је неколико степена „топлији“ од околног проводника може сматрати проблематичним, односно да то може да указује на почетак прогресивног пропадања предметног електричног контакта. У нормалним условима (чврста веза на месту контакта), конектори (папучице, стегаљке, завртњи) немају много већу температуру него проводници који се повезују (тада чврсто повезивање карактерише ниска електрична отпорност на

месту контакта). Међутим, када је присутан лош електрични спој на месту контакта, на површини оба метална дела (конектора и бакарног проводника) ствара се површински слој металног оксида знатно веће електричне отпорности, што доводи до прегревања на месту оствареног електричног контакта. Када механичка веза између два метална дела почне да се прегрева (до усијања), очигледно је да је реч о лошем електричном контакту и „врелој“ тачки на њему [80]. У поједностављеном облику, усијани спој може бити представљен паралелном везом која се састоји од практично непроводног моста чврстог бакар-оксида (CuO) и проводног растопљеног течног филамента (танког влакна састављеног од атома бакра и полупроводног бакар-оксида (Cu_2O)), који се манифестује као усијање нити дуж површине бакарног оксидног моста [83]. Струја која пролази кроз танак проводни слој, који има мању површину попречног пресека и већу отпорност због присуства Cu_2O једињења, узрокује пораст температуре, што може резултирати угљенисањем околне изолације и/или усијањем контакта [68,72,83]. Такође је показано да када струја (последично и температура усијаног контакта) достигне одређену вредност, отпорност оксида формираних између металних делова почиње да се смањује [68]. Измерена температура усијаних бакарних спојева на месту насталог електричног контакта припада опсегу 1100–1500 °C [68,80,84,85]. Повећање контактне отпорности на месту лошег контакта може довести до падова напона реда стотине милivolта, док усијан спој одликује пад напона између 1 V и 10 V, који зависи од јачине струје, геометрије контакта и материјала који га чине [6,68,70]. Није само бакар материјал који се може усијати на месту лошег контакта, већ то могу и други материјали који се користе у нисконапонским електричним инсталацијама [69]. Такви материјали су легуре бакра (месинг и бронза), које се користе у утичницама и прекидачима, али и челик (користи се често у завртњима шуко утикача и утичница и најчешће је никлован). Shea и Zhou [69] експериментално су проучавали разлике код појава усијаних контаката са различитим металима који се у пракси користе за електричне контакте. Симулација лоших електричних контаката, са струјама јачине до 5 A, помоћу покретне електроде која је притиснута силом од око 1 N, показала је да материјали засновани на бакру (бакар, месинг, бронза) могу бити груписани заједно у односу на њихово слично

понашање у смислу таласног облика и вредности напона усијаног контакта. Међутим, материјали засновани на гвожђу (челик и нерђајући челик) производе драстично различите таласне облике и вредности напона усијаног контакта, због чега формирају другу групу. Напоменимо да је у експериментима било много теже започети процес усијања бакарних проводника у односу на проводнике на бази гвожђа, тј. за бакарне проводнике је претходно било потребно остварити много више циклуса успостављања/прекидања електричног лука како би се постигло њихово усијања. Примећено је да се код проводника заснованих на гвожђу појављују усијане зоне, док се, као што је напред објашњено, на бакарним проводницима стварају усијања у облику филамента (танког влакна). Такође је закључено да материјали засновани на бакру производе релативно брзорастуће оксидне мостове између проводника, док се код оних на бази гвожђа не јављају значајни оксидни мостови током времена [69].

Остали експерименти [76] изведени су како би се утврдио утицај момента затезања завртњем изведених прикључака између бакарног проводника и завртња (најчешће израђеног од никлованог челика), као и микромераја проводника на месту контакта, на температуру и процес оксидације површине контакта. Како је у већини електроинсталационих компоненти веза бакарних проводника и прикључног места изведена преко завртња, предмет испитивања у докторској дисертацији били су и лоши електрични контакти настали услед редукције момента затезања завртња у електроинсталационој компоненти. Утикачи и утичнице представљају типичне електричне компоненте чији квар може довести до пожара [86], обично изазваног прегревањем на лабавим прикључцима [75,76]. Један од уобичајених узрока оваквог прегревања представља смањен момент затезања проводника на прикључку изведеном завртњем у утикачима и утичницама, који се може јавити услед микровибрација из околине, старења или немара од стране електроинсталатера [76]. Стога је неопходно боље разумети ефекте редукције момента затезања на загревање електричних контаката како би се побољшали уградња и одржавање електричних прикључака у утикачима и утичницама. Venfer и Gottuk [75] обавили су лабораторијско испитивање с циљем да процене утицај великог броја параметара на формирање прегрејаних спојева у утичницама у стамбеним објектима (лабавост прикључка, повећано електрично

оптерећење и запаљивост материјала у околини утичнице). Прегревања која су довела до квара утичнице десила су се у 85 од 408 испитаних утичница. До појаве пламена у утичницама дошло је у 12 случајева. Већина паљења (10 од 12) развила су се из врло лабавих контаката (окарактерисаних моментом затезања који је био мањи од 0,113 Nm (завртњем изведених прикључака), што представља најмањи момент затезања завртња који се може подесити коришћеним „момент-шрафцигером“). Остали експерименти су такође били изведени како би се утврдио утицај момента затезања завртњем изведених прикључака, као и помераја жице на прикључку, на температуру прикључка [76]. Бакарни кабл (са неметалним плаштом), попречног пресека око 2,1 mm², испитиван је помоћу струје оптерећења од 12,5 А, док је момент затезања био у распону од 0 до 1,36 Nm. Трајање испитивања је било ограничено на два сата, јер су почетна испитивања у трајању од осам сати показала да су завртњем изведени прикључци типично достигали стабилну температуру за 30–60 минута. Експерименти су показали да је температура прикључка расла до 90 °C при моментима затезања од 0,113 Nm, али да није била већа од 40 °C при моментима затезања изнад 0,452 Nm [76]. Након додатно изведених испитивања у којима су вршене провере ефекта макроскопског померања проводника, закључено је да је макроскопско померање проводника на месту насталог лошег контакта неопходно за појаву усијаног споја или достизање екстремно високе температуре, што доводи до топљења ожичења, прикључака и PVC-а утичнице (наглашавамо да су се у неким случајевима утичнице запалиле током описаних испитивања). У [87] је наглашено да, према Пашеновој кривој пробоја, најнижи пробојни напон ваздуха при атмосферском притиску износи око 327 V (за називне мрежне напоне 120 V и 230 V максималне вредности напона су 169 V и 324 V, респективно). То значи да неће свака усијана веза („врела“ тачка) постати редни електрични лук, посебно код нижег називног напона напојне мреже од 120 V. Међутим, за називни напон напојне мреже од 230 V, максимална вредност напона је врло близу најнижем пробојном напону ваздуха при атмосферском притиску, због чега постоји много већа вероватноћа да усијана веза (на лошем електричном контакту) постане редни електрични лук, нарочито ако је повећана јачина струје и довољно дуго траје, што је показано и експериментима спроведеним у докторској дисертацији. Истраживање приказано

у [74] и [75] изведено је у САД, са називним мрежним напоном од 120 V и фреквенцијом од 60 Hz. Због тога се могу очекивати различити резултати при условима који постоје у другим деловима света (где је уобичајен називни напон напојне мреже 230 V, а мрежна фреквенција 50 Hz). Такође, иако су се температуре прикључака на месту лошег електричног контакта у року од сат времена током испитивања приближиле својој стабилној вредности [76], постојала су и нека испитивања у којима температура споја није достигла стационарну вредност после сат времена. Напоменимо да у истраживањима описаним у [76] нису вршени вишечасовни експерименти, тако да нису могли да се сагледају сви термички процеси на електричном контакту који настају услед дуготрајног процеса оксидације површина контакта.

Прегревање прикључка електроинсталационе компоненте је последица „проласка“ струје кроз контакт који одликује висока електрична отпорност, узрокована смањеном ефективном површином контакта [88] и/или присуством различитих слојева на контактним површинама (као што су оксиди, контаминанти и продукти хемијских реакција) [78,87], као и редукције момента затезања завртња на електроинсталационој компоненти [74–76, 89]. Таква лоша електрична веза може се развити у усијани спој [68–70,88–91], а усијани спој може постати редни електрични лук [72,88,89,92,93]. Обе врсте квара могу проузроковати пожар, посебно ако су дуготрајне.

Управо због тога, коришћењем специјално пројектоване апаратуре, у докторској дисертацији је најдетаљније до сада експерименталним симулацијама испитан утицај лоших контаката узрокованих непотпуним преклапањем бакарног проводника и одговарајућег прикључка електроинсталационе компоненте на температуру контакта [88]. Лош контакт је симулиран непотпуним преклапањем електрода различитог попречног пресека, изложених различитим струјним оптерећењима. Анализиране су најчешће коришћене комбинације контактних материјала: бакар–бакар, бакар–месинг и бакар–нерђајући челик. Прецизно подешен проценат преклапања површина електрода износио је 100%, 50% и 15%. Детаљно је анализиран утицај свих наведених параметара на температуру контакта, појаву „вреле“ тачке, успостављање редног електричног лука и отпорност контакта.

У оквиру докторске дисертације такође су експериментално испитани топлотни ефекти лоших електричних контаката узрокованих смањеним моментом затезања завртњем изведених прикључака у утикачима и утичницама [89]. Лоши контакти, узроковани микровибрацијама околине или несавесним радом електроинсталатера, експериментално су симулирани променом вредности момента затезања. Испитани су различити типови бакарних проводника (лицнасти и пуног пресека), као и различите површине попречног пресека, при разним оптерећењима и њиховим различитим трајањима. Детаљно је анализиран утицај свих наведених параметара на температуру контакта и његову електричну отпорност, појаву „вреле“ тачке и успостављање редног електричног лука. Резултати истраживања у [89] представљали су важан корак у развоју методе за откривање лоших контаката у нисконапонским електричним инсталацијама.

Чињенице које су детаљно описане у [88,89] оправдавају сваки напор уложен у развој нових метода, техника и уређаја за откривање лоших електричних контаката у струјним колима [94–96]. Прва техника детекције „врелих“ тачака подразумева уградњу термичких сензора (најчешће полупроводничких), који се имплементирају на потенцијално опасним местима (најчешће на прикључним терминалима или стезаљкама) електричних компоненти и уређаја, како би се они заштитили од „врелих“ тачака, односно пожара. Други принцип детекције лоших електричних контаката („врелих“ тачака) заснован је на праћењу промене електричне отпорности контакта (односно, промене пада напона на контакту) помоћу специјалне електронске мерне опреме – сензора. У наведеним случајевима је најчешће реч о примени скупоцене опреме, због чега примена патентираних уређаја описаних у [94–96] нема масовну примену у широко распрострањеним нисконапонским електричним инсталацијама (уз то, требало би инсталирати огроман број сензора). Треба споменути и две данас актуелне технике детекције лоших електричних контаката. Прва је техника акустичке детекције, која представља ефикасно средство за детекцију лоших електричних контаката у индустријским постројењима. Она се заснива на чињеници да се простирање звучног сигнала кроз многобројне, али непрекинуте бакарне проводнике и проводнике шинског развода одликује веома малим слабљењем. Међутим, ова техника није практична у стамбеним, пословним и јавним објектима, у којима

многобројни контакти, уобичајени за тај тип електричних инсталација, доводе до великог слабљења сигнала [97]. Друга техника је термовизијско снимање, која представља широко распрострањену методу за превентивно откривање лоших електричних контаката [81]. Међутим, термовизијским прегледом је немогуће открити „вреле“ тачке на лошим електричним контактима уколико не постоји визуелни контакт између тачке посматрања и инфрацрвеног сензора термовизијске камере [98].

Друга могућност за откривање лоших контаката је побољшање процедура за верификацију квалитета нисконапонских електричних инсталација у зградама, датих у релевантним стандардима [99-101]. Стандардан поступак у оквиру периодичне верификације квалитета нисконапонских електричних инсталација је да се електричним мерењима отпорности петље квара изврши провера ефикасности система аутоматског искључења напајања у случају квара [102]. У периоду од 2010. до 2018. године, стручњаци из Лабораторије за испитивање нисконапонских електричних и громобранских заштитних инсталација на Електротехничком факултету Универзитета у Београду извршили су бројне верификације квалитета нисконапонских електричних инсталација у јавним и пословним објектима, којима је оперативно руководио аутор докторске дисертације. У свим тим објектима примењен је *TN* систем заштите од електричног удара. Испитивањем отпорности петљи квара примећено је да су њихове вредности углавном биле у распону од неколико стотина $m\Omega$ (за струјна кола на нижим етажама зграда, чија је трансформаторска станица (10/0,4 kV) била постављена унутар зграде или у њеној непосредној близини) до око 1Ω (за струјна кола на вишим етажама). Међутим, за неке испитане утичнице измерена вредност отпорности петље квара износила је неколико ома. Садашња стандардна процедура [102] заснована је на упоређивању измерене отпорности петље квара са граничном вредношћу која омогућава довољно брзо реаговање одговарајуће заштитне компоненте (како би се спречио опасан електрични удар). Пошто су прописане граничне вредности високе, свако струјно коло на коме је измерена отпорност петље квара од неколико ома проглашено је исправним, иако су нека од њих садржала лош електрични контакт (који може да постане узрочник пожара).

Да би се избегли овакви (погрешни) закључци, важно је побољшати процедуру за периодичну верификацију квалитета нисконапонских електричних инсталација тако да она обезбеди рано откривање лоших електричних контаката. Детаљно разрађена идеја у докторској дисертацији заснована је на детекцији приметног повећања отпорности петље квара и/или отпорности петље кратког споја током периодичне верификације квалитета нисконапонских електричних инсталација. Према стандарду [103], (конвенционална) мерна опрема за верификацију квалитета нисконапонских електричних инсталација омогућава мерење отпорности обе петље.

Лоши контакти се често јављају у утичницама које су биле у употреби велики број година, нарочито ако су биле изложене влази, гасном окружењу или неком загађивачу. У таквим случајевима контакти могу лако да кородирају, што доводи до постепеног погоршања металних површина на месту контакта. Glas са сарадницима [104] изложио је утичнице водоник-сулфиду и испитао њихове електричне и термичке карактеристике. Иако није откривено повећање електричне отпорности контаката нити њихово прегревања, предложено је да се испита утицај других агресивних окружења која могу довести до оштећења контаката и прегревања.

Freni и Gradel [105] констатовали су да је корозија скоро увек резултат синергијског деловања неколико атмосферских компоненти, и то у траговима. Према њиховом мишљењу, испитивање треба да се заснива на присуству најмање једног гаса који садржи сумпор, гаса који садржи хлор (нпр. HCl) и гаса који садржи азот (нпр. HNO₃ (азотна киселина)). Ђорђевић са сарадницима [106] испитивала је састав атмосферских аеросола у Београду и показала да су најраширенији гранични аеросоли NH₃ (амонијак), H₂SO₄ (сумпорна киселина) и HNO₃, затим HCl и разне кондензационе органске киселине.

У докторској дисертацији је показано да лоши контакти, чија је електрична отпорност у опсегу од 80 mΩ до 250 mΩ, представљају претњу по безбедност ако је јачина струје велика (струја од 16 А, коју генерално ограничавају класичне заштитне компоненте, представља максималну називну струју у струјним колима инсталираним у стамбеним, пословним и јавним зградама прикљученим на напојну мрежу са називним фазним напоном од 230 V и мрежном учестаношћу од

50 Hz) [89]. Ако се оштећени контакт оптерети мањим струјама, његова отпорност наставља да расте и може да достигне вредност преко 1 Ω . Ако у таквом струјном колу (са отпорношћу контакта већом од 1 Ω) струја износи око 16 А, знатна снага ће бити дисипирана на лошем контакту, повећавајући услове за сагоревање и паљење околне пластике. Да би се утврдио опсег отпорности лошег контакта у старим електричним инсталацијама (који је потребан за развој нове процедуре која би у оквиру периодичне верификације квалитета нисконапонских електричних инсталација служила да се на време детектују лоши електрични контакти), у докторској дисертацији је извршен низ експеримената на утичници која је коришћена преко 30 година, као и на новој утичници са електричним контактима намерно изложеним корозији (третирањем хемијским средствима) [98]. У лабораторији су експериментално испитани ефекти редукције момента затезања прикључака изведених завртњем на њихово загревање и електричну отпорност, како у старој (коришћеној) утичници тако и у две нове утичнице са намерно кородираним спојевима. У једној од нових утичница процес корозије на прикључку био је убрзан третирањем царском водицом (смеша азотне и хлороводоничне киселине), а у другој третирањем концентрованом сумпорном киселином. Показано је да се коришћењем ових киселина може симулирати повећање температуре и електричне отпорности контакта утичнице тако да одговарају оним код старих утичница. Такође, у докторској дисертацији је анализирана могућност детекције лошег контакта у струјном колу мерењем отпорности петље квара и кратког споја у току периодичне верификације квалитета нисконапонских електричних инсталација [98]. На основу резултата лабораторијских експеримената и периодичних верификација нисконапонских електричних инсталација у јавним и пословним објектима са укупно 11.243 испитаних утичница (којима је оперативно руководио аутор докторске дисертације), у оквиру дисертације је развијена нова процедура за детекцију лоших контаката у нисконапонским електричним инсталацијама са *TN* системом заштите [98]. Предложена процедура обезбеђује информације о лошим контактима и њиховој локацији у струјном колу (на фазном, неутралном и/или заштитном проводнику), што се постиже поређењем отпорности петље квара и петље кратког споја са граничним вредностима које су дефинисане у докторској

дисертацији (и у референци [98] у којој су публиковани резултати истраживања спроведених у оквиру предметне дисертације).

1.8. Предмет истраживања

Предмет истраживања у докторској дисертацији је детекција лоших контаката у нисконапонским електричним инсталацијама, који могу настати у разводном орману или његовом напојном воду, као и било где у струјном колу (на споју проводника у разводној кутији, на споју утикача и утичнице, на споју проводника и прикључног завртња у прекидачу, утикачу, утичници, разводној кутији, осигурачу, аутоматском прекидачу, продужном каблу, пријемнику електричне енергије...) [66]. На лошем контакту може доћи до прегревања, чиме се формира „врела“ тачка. Уколико температура „вреле“ тачке премаши вредност трајно дозвољене температуре околне електричне изолације, долази до деградације њених својстава. Даљим порастом температуре на лошем контакту може доћи до паљења електричне изолације проводника, или електроинсталационог елемента, као и околног запаљивог материјала.

Један од циљева истраживачког рада у докторској дисертацији је да се изврши анализа топлотних ефеката изазваних лошим електричним контактом. Она ће обухватити лоше контакте који настају:

- због непотпуног налегања површине бакарног проводника и контактне површине електроинсталационог елемента, која је израђена од разних материјала (бакар, месинг и нерђајући челик – прохром), и
- због смањења силе притиска налегања контактних површина бакарног проводника и завртња у електроинсталационом елементу (које се постиже редукијом момента затезања завртња на шуко-утикачу или утичници).

За разне комбинације електричних контаката (бакар–бакар, бакар–месинг и бакар–нерђајући челик) утврдиће се који је при истим условима (једнако струјно оптерећење, исти пресек проводника и исти степен погоршања контакта) критичан у погледу достизања максималне трајно дозвољене температуре (на пример, максимална трајно дозвољена температура за *PVC* изолацију износи 70 °C [27]). У овим истраживањима је коришћена специјално пројектована апаратура, којом је реално симулиран утицај лоших контаката узрокованих непотпуним

преклапањем бакарног проводника и одговарајућег прикључка нисконапонске електроинсталационе компоненте на температуру контакта. Лош контакт је симулиран употребом електрода разних попречних пресека изложених различитим оптерећењима.

Такође ће се испитати како редуција момента затезања завртња у електроинсталационој компоненти (нпр. у шуко-утикачу или шуко-утичници) доприноси настајању „вреле“ тачке у случају:

- бакарног проводника пуног пресека, и
- лицнастог бакарног проводника.

Извођењем и анализом резултата великог броја експеримената установиће се како редуција момента затезања завртња на бакарни проводник пуног пресека или лицнасти бакарни проводник утиче на пораст температуре контакта у шуко-утикачу и шуко-утичници. У складу с тим, утврдиће се да ли су неповољнији лоши контакти у уграђеној електричној инсталацији објекта (која се уобичајено изводи бакарним проводницима пуног пресека) или лоши контакти у напојним кабловима пријемника (најчешће израђеним од лицнастих бакарних проводника). Напоменуто да ће све анализе обухватити како лоше контакте на новим електроинсталационим компонентама (са и без намерно изазване корозије) тако и лоше контакте на старим, дуго коришћеним електроинсталационим компонентама. Извешће се низ експеримената на утичници која је коришћена дуги низ година (30 година), као и експерименти на новим утичницама, али са електричним контактима намерно изложеним корозији. Да би се убрзао процес корозије, у једној од нових утичница прикључак фазног проводника ће се третирају царском водом (концентрирана HNO_3 : концентрирана $\text{HCl} = 1:3$ (v / v)), а у другој новој утичници прикључак неутралног проводника третираће се концентрираном сумпорном киселином (H_2SO_4). Извршиће се поређење ефеката редуције момента затезања завртња на прикључцима утичница (старе (коришћене) утичнице и две нове утичнице (са намерно кородираним спојевима)) на загревање и електричну отпорност контакта.

Један од главних циљева предметног истраживања је да се на основу претходне анализе спроведених експеримената и резултата верификација електричних инсталација на терену (стручни налази [50–59]) дефинише нова

методологија за рано откривање лошег контакта, која би се заснивала на утврђивању корелације отпорности петљи квара и кратког споја и степена погоршања контакта. Она би могла да постане део процедуре која се користи приликом периодичних верификација квалитета нисконапонских електричних инсталација заснованих на електричним мерењима [27].

Новоразвијена методологија за рано откривање лошег електричног контакта примениће се у стамбеним јединицама различите старости (10–60 година). Такође, провериће се веза између старости стамбених јединица (тачније, старости њихових електричних инсталација) и вероватноће настанка опасне „вреле“ тачке на лошем електричном контакту у трофазном струјном колу које напаја електрични шпорет, као и у већини монофазних струјних кола.

На месту настанка лошег контакта, временом може доћи до успостављања редног електричног лука, који услед континуалног ослобађања топлоте може да изазове паљење околне електричне изолације или запаљивог материјала [22,23,25,32,34,48,49,62–65,72]. На европском тржишту се недавно појавила заштитна *AFDD* (*Arc Fault Detection Device*) компонента [34,49,64], која се у разводну таблу уграђује уместо аутоматског прекидача и има могућност да, поред основних кварова (кратак спој и преоптерећење), препозна и нежељени редни електрични лук (најчешће настао на месту где се појавио лош електрични контакт) и на време прекине напајање струјног кола у коме се он појавио. Циљ истраживања биће и експериментално испитивање (тестирање) функционалности *AFDD* компоненте, које ће се спровести у Лабораторији за испитивање нисконапонских електричних и громобранских заштитних инсталација Електротехничког факултета Универзитета у Београду. Под тестирањем функционалности *AFDD* компоненте подразумева се не само провера њеног правовременог реаговања у свим релевантним ситуацијама, него и провера одсуства њеног реаговања у струјним колима са пријемницима чији нормалан рад прати појава виших хармоника или електричног лука. Уколико резултати испитивања буду у свему позитивни, препоручиће се инсталирање компоненти сличних *AFDD*-у у јавним и пословним објектима у Србији у којима се окупља већи број људи (на пример, обданишта, школе, факултети, болнице, спортске

хале, робне куће, биоскопи, позоришта, кафићи итд.), а у циљу смањења броја пожара узрокованих кваром на електричним инсталацијама.

Пошто се ускоро очекује доношење правилника по коме ће периодичне верификације квалитета нисконапонских електричних инсталација постати обавезне, потребно је унапредити постојећу методологију за њихово обављање. Додатна процедура за утврђивање стања електричних контаката, која би се спроводила у оквиру испитивања електричним мерењем, сигурно ће омогућити правовремене превентивне акције за спречавање појаве почетног пожара на електричним инсталацијама. Усвајање додатне процедуре за рано откривање лошег електричног контакта у оквиру постојеће редовне процедуре којом се проверава ефикасност примењеног TN система заштите од електричног удара представљаће оригиналан допринос докторске дисертације.

1.9. Структура докторске дисертације

У уводном поглављу је представљена статистика пожара код нас и у свету, са посебним освртом на пожаре које изазивају електричне инсталације. Дат је преглед кварова (и нерегуларних ситуација, као што је нпр. преоптерећење струјног кола) на нисконапонским електричним инсталацијама, као и преглед и принципи рада класичних заштитних компоненти (осигурача са топљивим уметком, аутоматског прекидача, ЗУДС-а...). Објашњен је значај савремене технике за рано откривање лоших електричних контаката засноване на термовизијском снимању електроинсталационих компоненти, са посебним освртом на подешавање релевантних квантитативних параметара које се врши приликом термовизијског снимања. Такође, дате су препоруке за анализу резултата снимања, као и критеријуми за доношење одлуке о приоритетима отклањања уочених недостатака. Као заштита од нежељеног редног електричног лука, представљене су савремене заштитне компоненте, које помоћу „паметне“ електронике и утврђеног алгоритма могу да препознају карактеристике горења редног електричног лука и прекину напајање струјног кола у коме се он појавио. Представљена је регулатива, код нас и у свету, која се односи на верификацију квалитета нисконапонских електричних инсталација, а посебно је истакнут проблем детекције лошег електричног контакта. У последњем делу уводног

поглавља дат је детаљан преглед публикованих резултата у вези са топлотним ефектима на лошем електричном контакту, на основу кога је дефинисан предмет истраживања докторске дисертације.

Друго поглавље обрађује лош електрични контакт настао услед непотпуног налегања бакарног проводника и контактне површине електроинсталационог елемента. Електрични контакт по правилу образују бакарни проводници или бакарни проводник и контактна површина одговарајућег дела електроинсталационе компоненте (нпр. стезалке, папучице, клеме) која је израђена од другачијег материјала (у пракси се најчешће користе месинг или нерђајући челик – прохром). Изведен је велики број експеримената са електродама од бакра, месинга и нерђајућег челика (попречних пресека: $1,5 \text{ mm}^2$, $2,5 \text{ mm}^2$ и 4 mm^2) и анализирани су добијени резултати. Установљена је критична комбинација материјала коју при истим условима (једнако струјно оптерећење, исти пресек проводника и исти степен погоршања контакта) карактерише највећи пораст температуре. Лош електрични контакт за све реализоване експерименте симулиран је на посебно конструисаној апаратури.

Лош електрични контакт настао услед редукације момента затезања завртња у електроинсталационој компоненти анализиран је у трећем поглављу. Изведен је велики број експеримената са циљем да се установи како редукација момента затезања завртња (на бакарни проводник пуног пресека или лицнасти бакарни проводник) утиче на пораст температуре контакта у шуко-утикачу и шуко-утичници, компонентама електричних инсталација које се масовно користе и на којима се лоши контакти најчешће појављују у пракси. Утврђено је да су неповољнији лоши контакти у уграђеној електричној инсталацији објекта (која се уобичајено изводи бакарним проводницима пуног пресека) у односу на лоше контакте у напојним кабловима пријемника који су израђени од лицнастих бакарних проводника.

У четвртом поглављу је развијена методологија за откривање лоших електричних контаката, чиме је значајно унапређена постојећа процедура за верификацију квалитета електричних инсталација ниског напона која се односи на испитивања електричним мерењима. Мерење отпорности петље квара обавља се у оквиру периодичних верификација квалитета нисконапонских електричних

инсталација и служи за проверу ефикасности система заштите аутоматским искључењем напајања у случају квара. Утврђено је да повећана вредност отпорности петље квара (најчешће узрокована појавом лошег контакта) углавном задовољава прописане безбедносне услове са становишта провере ефикасности система заштите од електричног удара у случају квара, иако постоји реална опасност од појаве „вреле“ тачке у струјном колу. Унапређење постојеће процедуре заснива се на увођењу додатног мерења – поред отпорности петље квара, мери се и отпорност кратког споја за свако струјно коло. Препорука за вршење превентивног притезања контаката у струјном колу заснива се на измереним вредностима отпорности петље квара и кратког споја: препоручиће се да се оно врши када њихове измерене вредности пређу гранично дозвољене. Гранично дозвољене вредности су установљене како на основу анализе резултата добијених у извршеним експериментима (у лабораторији) тако и на основу статистичке анализе података добијених у оквиру изузетно великог броја мерења отпорности петље квара изведених на терену. Урађен је низ експеримената на утичници која је коришћена дуги низ година (30 година у конкретном анализираном случају), као и експерименти на новим утичницама, али са електричним контактима намерно изложеним корозији. Да би се убрзао процес корозије, у једној од нових утичница прикључак фазног проводника је третиран царском водом (концентрована HNO_3 : концентрована $\text{HCl} = 1:3$ (v / v)), а у другој новој утичници прикључак неутралног проводника третиран је концентрованом сумпорном киселином (H_2SO_4). Коришћењем ових хемикалија симулиран је ефекат дуготрајног излагања електричних контаката електроинсталационих компоненти киселој атмосфери. Поређењем резултата мерења која су за циљ имала да се упореде ефекти редуције момента затезања завртња на прикључцима утичница (старе (коришћене) утичнице и две нове утичнице (са намерно кородираним спојевима)) на загревање и електричну отпорност контакта, показано је њихово слично понашање. Успостављена је корелација између измерене вредности отпорности петље квара и отпорности кратког споја и степена погоршања контакта (повећања његове електричне отпорности). Спровођењем нове, али једноставне процедуре у оквиру редовне периодичне верификације квалитета нисконапонских електричних инсталација, контролише се стање свих

електричних контаката у струјним колима и омогућава да се правовременим превентивним акцијама притезања контаката (или замене оштећене електричне компоненте) спречи настајање (одржавање) „врелих“ тачака на њима. Увођењем описане процедуре решен је проблем немогућности да се термовизијском камером открију опасне „вреле“ тачке које се не налазе на видним местима. На крају четвртог поглавља дати су резултати мерења у оквиру верификација квалитета нисконапонских електричних инсталација у којима је успешно примењена нова методологија за рано откривање лошег електричног контакта у стамбеним јединицама различите старости (10–60 година). Закључено је да не постоји веза између старости стамбених јединица (тачније, старости њихових електричних инсталација) и вероватноће настанка опасне „вреле“ тачке на лошем електричном контакту.

У петом поглављу је разматрана функционалност рада *Siemens*-ове *AFDD* (*Arc Fault Detection Device*) компоненте, која представља заштиту у случају настанка редног електричног лука. Представљени су резултати великог броја лабораторијских експеримената помоћу којих су симулиране све релевантне ситуације успостављања редног електричног лука и понашања *AFDD*-а у таквим ситуацијама. Извршени су:

- експерименти помоћу којих је проверавана функционалност (реаговање) *AFDD* компоненте у случају успостављања редног електричног лука, и то за следеће комбинације материјала електрода: бакар–бакар и бакар–месинг,
- експерименти помоћу којих је проверавана функционалност (нераговање) *AFDD* компоненте при нормалном раду нелинеарних пријемника који садрже енергетску електронику (фрижидера, персоналних рачунара, ласерских штампача, микроталасних пећница и клима-уређаја),
- експерименти помоћу којих је проверавана функционалност (нераговање) *AFDD* компоненте при нормалном раду пријемника који садрже колекторски мотор (усисивач, бушилица и фен),
- експерименти помоћу којих је проверавана функционалност (реаговање) *AFDD* компоненте при појави редног електричног лука у струјном колу термичког пријемника на које су прикључени и нелинеарни пријемници или пријемници који у свом саставу имају колекторске моторе (рачунари,

ласерски штампачи, микроталасна пећница, клима-уређај, фрижидер, усисивач, фен, бушилица итд.). Помоћу ових тестова је вршена провера да ли струје наведених пријемника могу да „маскирају“ јединствен таласни облик струје редног електричног лука.

На основу резултата наведених експеримената, дата је препорука за инсталирање *AFDD* компоненте у објектима у којима се окупља велики број људи.

На крају рада, у оквиру закључног поглавља, сажето су приказани сви важнији резултати истраживања у оквиру докторске дисертације, као и главни доприноси дисертације на пољу заштите грађевинских објеката од пожара узрокованих појавом лошег електричног контакта на нисконапонским електричним инсталацијама. Изведени су најважнији закључци и на основу њих дате смернице за даља истраживања у овој области. Такође, дате су и смернице за промоцију и примену нове методе за детекцију лоших електричних контаката.

2 ЛОШ КОНТАКТ НАСТАО УСЛЕД СМАЊЕЊА ЕФЕКТИВНЕ ПОВРШИНЕ КОНТАКТА

Истраживање је почело проучавањем утицаја лоших електричних контаката на настајање „врелих“ тачака које могу да изазову почетни пожар. Проучени су разни физички и хемијски узроци настанка лошег електричног контакта, као и њихов утицај на електричне параметре струјног кола и термичке процесе на анализираним електроинсталационим компонентама. Прве анализе су обухватиле лоше контакте који настају:

- због непотпуног налегања (преклапања) површине бакарног проводника и контактне површине електроинсталационог елемента израђене од разних материјала (бакар, месинг и нерђајући челик – прохром) – поглавље 2 докторске дисертације, и

- због редукције момента затезања завртњем изведених прикључака између бакарног проводника и прикључног елемента електроинсталационе компоненте (на шуко-утикачу и утичници) – поглавље 3 докторске дисертације.

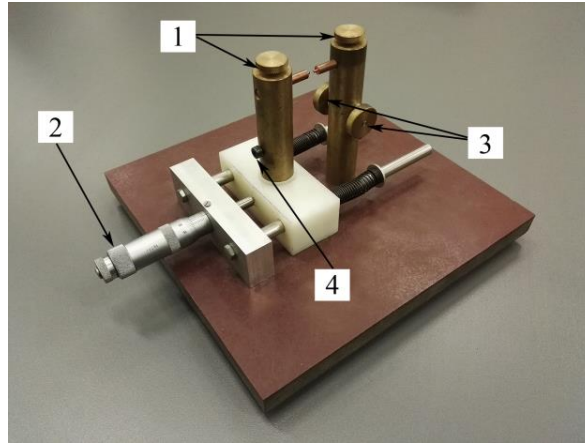
На реалним електроинсталационим компонентама било је практично неизводљиво прецизно подешавање унапред одређеног процента површине преклапања контакта између бакарног проводника и прикључног елемента (стегаљке, клеме, завртња). Због тога је на специјално конструисаној апаратури експериментално симулиран лош електрични контакт који настаје услед смањене ефективне површине преклапања контактних површина, која се прецизно може подесити. Сви експерименти представљени у поглављу 2 докторске дисертације, који се односе на истраживање утицаја непотпуног налегања (преклапања) површине бакарног проводника и контактне површине електроинсталационог елемента на понашање лошег контакта, извршени су са новим електродама, због чега се може рећи да су све експерименталне симулације одговарале реалним случајевима у којима се проблем лошег електричног контакта јавља на електроинсталационим компонентама нових електричних инсталација.

Како је редукцију момента затезања завртњем изведених прикључака између бакарног проводника и прикључног елемента нове електроинсталационе компоненте могуће прецизно остварити употребом дигиталних и механичких

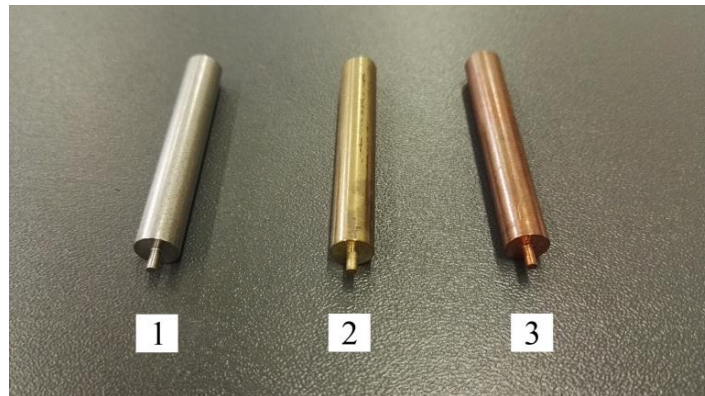
„момент-шрафцигера“, сви експерименти који се односе на истраживање утицаја редукције момента затезања завртњем изведених прикључака између бакарног проводника и прикључног елемента електроинсталационе компоненте на понашање лошег контакта извршени су на реалним компонентама (на новим шуко-утикачима и утичницама). Опис тих експеримената, резултати добијени мерењима и анализа резултата представљени су у поглављу 3 докторске дисертације.

2.1 Поставка експеримената

Сви експерименти су изведени у Лабораторији за испитивање нисконапонских електричних и громобранских заштитних инсталација на Електротехничком факултету Универзитета у Београду. Употребом специјално пројектоване апаратуре (приказане на слици 27), која је слична оним приказаним у референцама [68] и [69], симулиран је лош електрични контакт помоћу електрода кружног попречног пресека (њихове површине попречног пресека износиле су $1,5 \text{ mm}^2$, $2,5 \text{ mm}^2$ и 4 mm^2), израђених од бакра, месинга и нерђајућег челика (прохрома). За сваки експеримент су коришћене нове електроде (приказане на слици 28). Будући да бакар формира оксидне слојеве који непрекидно расту (за разлику од неких других материјала који досегну асимптотску вредност дебљине оксидног слоја) [71], све електроде коришћене у овом истраживању означене су и ускладиштене, тако да би се иста анализа (експериментално симулирање лоших електричних контаката у старим електричним инсталацијама) могла извршити у оквиру даљег истраживања у области коју обрађује предметна докторска дисертација.



Слика 27. Апаратура која обезбеђује подешавање површине преклапања електрода (1. стезаљке које омогућавају стабилну позицију електрода, 2. завртњак за постизање чврстог контакта између електрода, 3. стезаљке за подешавање површине преклапања између електрода, и 4. једна од стезаљки за повезивање апаратуре са извором напајања)



Слика 28. Испитне електроде по попречног пресека 1,5 mm² од нерђајућег челика (1), месинга (2) и бакара (3)

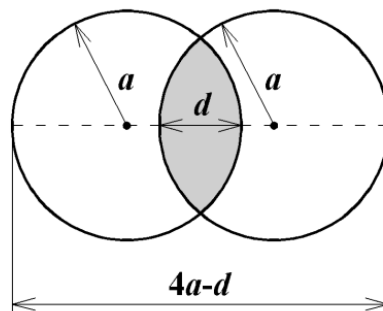
Као што је већ наведено, испитивања су обухватила следеће комбинације материјала који се најчешће користе у спојевима са стезаљкама, завртњима, папучицама и прикључцима који постоје у различитим електроинсталационим компонентама: бакар–бакар, бакар–месинг и бакар–нерђајући челик. Апаратура је обезбедила стабилан положај сваке електроде, њихов чврст контакт и прецизно подешавање површине преклапања.

Променом процента површине преклапања између електрода симулирани су електрични контакти различитог квалитета (испитане су површине контакта у којима је остварено 100%, 50% и 15% преклапања). У свим експериментима стабилна позиција електрода постигнута је коришћењем стезаљки означених са 1 на слици 27, док је чврст контакт између врхова електрода остварен притезањем завртња означеног са 2. Стезаљке означене са 3 коришћене су за подешавање

површине преклапања између електрода. Постоје и две стезаљке намењене повезивању електрода на мрежу (једна од њих, означена са 4, може се видети на слици 27). Табела 10 показује растојања између крајњих тачака електрода (означена су са $4a-d$ на слици 29) за све три површине попречног пресека електрода и сва три случаја њиховог преклапања (растојања су подешена коришћењем прецизног електронског нонијуса). Извршена су укупно 72 експеримента, у којима су обухваћене све три површине попречног пресека електрода, сва три типа преклапања и све три комбинације материјала. За површину попречног пресека електрода од $1,5 \text{ mm}^2$ струје су биле приближно 8 А и 10 А ($3 \cdot 3 \cdot 2 = 18$ експеримената), за $2,5 \text{ mm}^2$ оне су износиле око 10 А, 13 А и 16 А ($3 \cdot 3 \cdot 3 = 27$ експеримената) и за 4 mm^2 оне су износиле око 16 А, 20 А и 25 А ($3 \cdot 3 \cdot 3 = 27$ експеримената).

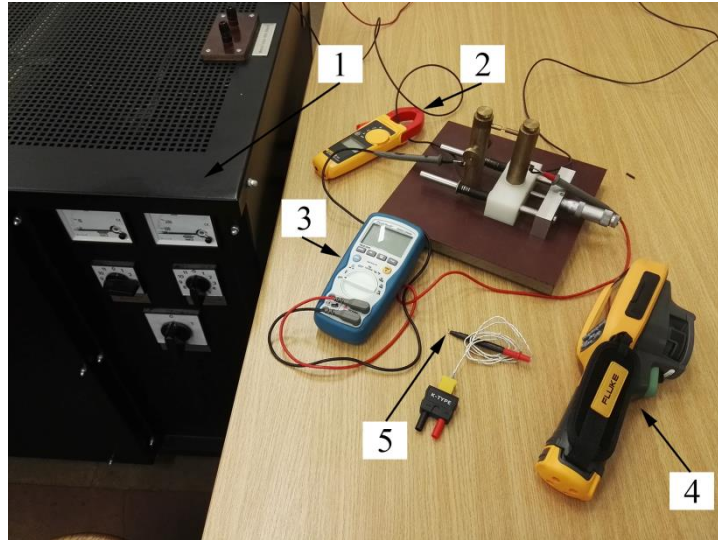
Табела 10. Вредности растојања $4a-d$ у свим разматраним случајевима

| Процент површине преклапања две електроде (%) | $4a-d$ (mm) | | |
|---|---|------|------|
| | Попречни пресек електрода (mm^2) | | |
| | 1,5 | 2,5 | 4 |
| 15 | 2,40 | 3,11 | 3,93 |
| 50 | 1,94 | 2,50 | 3,16 |
| 100 | 1,38 | 1,78 | 2,25 |

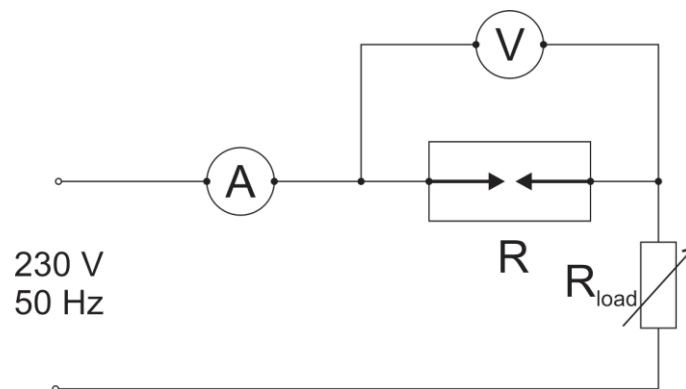


Слика 29. Преклапање електрода (осенчено)

Поставка експеримента је приказана на слици 30, а шема везе на слици 31.



Слика 30. Експериментална поставка за анализу лошег контакта услед смањења ефективне површине контакта (1. отпорничка кутија, 2. струјна клешта, 3. мултиметар (прецизан волтметар), 4. термовизијска камера, и 5. термопар)



Слика 31. Шема везе

Струја оптерећења је подешавана помоћу регулационе отпорничке кутије 230 V, 60 A (означене са 1 на слици 30, и са R_{load} на слици 31) и мерена струјним клештима *Fluke 323* (означеним са 2 на слици 30). Напон између електрода је мерен мултиметром *DMM PeakTech 3360* (означеним са 3 на слици 30), који је био повезан са стезаљкама означеним са 4 на слици 27.

Мерења температуре контакта вршена су сваких десет минута коришћењем термовизијске камере (*Fluke Ti125*, означене са 4 на слици 30, чија је тачност ± 2 °C или 2% [107]). Максимална температура која се може измерити помоћу ове термовизијске камере износи 385 °C (коэффициент емисивности је био подешен на вредност 0,80, која је била најближа табличним вредностима за испитиване материјале). Температуре контакта за спојеве бакар–месинг и комбинације бакар–

нерђајући челик веће од 385 °C мерене су помоћу термопара типа К (означеног са 5 на слици 30), чијим се врхом истовремено дотакну обе електроде што је могуће ближе оствареном контакту. Укупно трајање већине експеримената било је 60 минута, док су у неким случајевима трајали и по неколико сати.

Током сваког мерења температуре контакта, електрична отпорност контакта (означеног са R на слици 31) мерена је применом $U-I$ методе. Струја и напон су мерени напред наведеним струјним клештима и мултиметром (означени са A и V на слици 31).

2.2 Резултати мерења и дискусија

Резултати мерења показују какво је понашање контакта (за различите комбинације материјала) за које при истим условима (истом струјном оптерећењу, пресеку проводника и степену погоршања контакта у смислу истог процентуалног смањења ефективне површине преклапања) контакт најбрже достиже максималну трајно дозвољену температуру и колико је трајање евентуално успостављеног електричног лука између електрода. Приказани су у 27 табела које се налазе у Прилогу 2 (9 за сваку комбинацију материјала, са 3 различите површине попречног пресека и 3 различите површине преклапања). Табеле 11-18 представљене у овом поглављу изабране су да покажу како сваки од разматраних параметара (комбинација материјала, површина попречног пресека, површина преклапања и струја) утиче на понашање контакта (t – време протекло од почетка експеримента, I – јачина струје кроз електроде, U – напон на контакту, R – отпорност контакта и T – температура контакта). У табелама 14-18 знак звездице (*) односи се на појаву редног електричног лука, док знак двоструке звездице (**) означава прекид његовог горења.

Табела 11. Резултати мерења за комбинацију електрода бакар–бакар и површину преклапања од 15% (површина попречног пресека: 4 mm²)

| | | | | | | | |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|
| t (min.) | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| I (A) | 16,0 | 16,0 | 16,0 | 16,0 | 16,0 | 15,9 | 15,9 |
| U (V) | 0,0173 | 0,0247 | 0,0394 | 0,158 | 0,185 | 0,175 | 0,179 |
| R (Ω) | 0,001 | 0,002 | 0,002 | 0,010 | 0,012 | 0,011 | 0,011 |
| T (°C) | 28 | 33 | 35 | 36 | 37 | 38 | 40 |
| t (min.) | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| I (A) | 20,1 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 |
| U (V) | 0,024 | 0,073 | 0,097 | 0,127 | 0,128 | 0,133 | 0,178 |
| R (Ω) | 0,001 | 0,004 | 0,005 | 0,006 | 0,006 | 0,007 | 0,009 |
| T (°C) | 28 | 42 | 42 | 42 | 43 | 43 | 45 |
| t (min.) | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| I (A) | 25,1 | 25,0 | 25,0 | 25,0 | 25,0 | 25,0 | 25,0 |
| U (V) | 0,0354 | 0,0656 | 0,0753 | 0,0945 | 0,127 | 0,138 | 0,181 |
| R (Ω) | 0,001 | 0,003 | 0,003 | 0,004 | 0,005 | 0,006 | 0,007 |
| T (°C) | 28 | 44 | 48 | 48 | 49 | 49 | 50 |

Табела 12. Резултати мерења за комбинацију електрода бакар–бакар и површину преклапања од 15% (површина попречног пресека: 2,5 mm²)

| | | | | | | | |
|-----------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| t (min.) | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| I (A) | 10,0 | 9,9 | 9,9 | 9,9 | 9,9 | 9,9 | 9,9 |
| U (V) | 0,0278 | 0,144 | 0,442 | 0,552 | 0,621 | 0,678 | 0,718 |
| R (Ω) | 0,003 | 0,015 | 0,045 | 0,056 | 0,063 | 0,068 | 0,073 |
| T (°C) | 27 | 34 | 36 | 51 | 65 | 70 | 73 |
| t (min.) | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| I (A) | 13,1 | 13,1 | 13,1 | 13,1 | 13,1 | 13,1 | 13,1 |
| U (V) | 0,0387 | 0,306 | 0,365 | 0,496 | 0,574 | 0,806 | 0,838 |
| R (Ω) | 0,003 | 0,023 | 0,028 | 0,038 | 0,044 | 0,062 | 0,064 |
| T (°C) | 27 | 53 | 54 | 58 | 66 | 72 | 77 |
| t (min.) | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| I (A) | 16,0 | 16,0 | 16,0 | 16,0 | 16,0 | 16,0 | 16,0 |
| U (V) | 0,0582 | 0,120 | 0,289 | 0,335 | 0,446 | 0,698 | 0,860 |
| R (Ω) | 0,004 | 0,008 | 0,018 | 0,021 | 0,028 | 0,044 | 0,054 |
| T (°C) | 24 | 33 | 43 | 58 | 61 | 70 | 78 |

Табела 13. Резултати мерења за комбинацију електроде бакар–месинг и површину преклапања од 100% (површина попречног пресека: 2,5 mm²)

| | | | | | | | |
|-----------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| t (min.) | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| I (A) | 10,0 | 10,0 | 10,0 | 10,0 | 9,9 | 9,9 | 9,9 |
| U (V) | 0,0284 | 0,114 | 0,399 | 0,442 | 0,526 | 0,548 | 0,569 |
| R (Ω) | 0,003 | 0,011 | 0,040 | 0,044 | 0,053 | 0,055 | 0,057 |
| T (°C) | 28 | 33 | 38 | 43 | 49 | 51 | 52 |
| t (min.) | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| I (A) | 13,2 | 13,2 | 13,1 | 13,1 | 13,0 | 12,9 | 12,9 |
| U (V) | 0,0816 | 0,135 | 0,570 | 0,731 | 0,783 | 0,825 | 0,948 |
| R (Ω) | 0,006 | 0,010 | 0,044 | 0,056 | 0,060 | 0,064 | 0,073 |
| T (°C) | 28 | 44 | 61 | 66 | 67 | 68 | 69 |
| t (min.) | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| I (A) | 16 | 15,9 | 15,8 | 15,8 | 15,8 | 15,8 | 15,8 |
| U (V) | 0,0938 | 0,421 | 0,559 | 0,870 | 0,915 | 1,050 | 1,160 |
| R (Ω) | 0,006 | 0,026 | 0,035 | 0,055 | 0,058 | 0,066 | 0,073 |
| T (°C) | 28 | 38 | 57 | 65 | 69 | 71 | 73 |

Табела 14. Резултати мерења за комбинацију електрода бакар–месинг и површину преклапања 50% (површина попречног пресека: 2,5 mm²)

| | | | | | | |
|------------------------|--------|-------|--------|-------|-------|----|
| <i>t</i> (min.) | 0 | 10 | 20 | 30 | 35 | 38 |
| <i>I</i> (A) | 10,0 | 10,0 | 10,0 | 9,9 | 9,6 * | ** |
| <i>U</i> (V) | 0,0599 | 0,343 | 0,936 | 1,005 | 25,2 | / |
| <i>R</i> (Ω) | 0,006 | 0,034 | 0,094 | 0,102 | 2,625 | / |
| <i>T</i> (°C) | 26 | 36 | 47 | 52 | >385 | / |
| <i>t</i> (min.) | 0 | 10 | 17 | 19 | / | / |
| <i>I</i> (A) | 13 | 12,9 | 12,7 * | ** | / | / |
| <i>U</i> (V) | 0,072 | 0,528 | 35,2 | / | / | / |
| <i>R</i> (Ω) | 0,006 | 0,041 | 2,772 | / | / | / |
| <i>T</i> (°C) | 30 | 58 | >385 | / | / | / |
| <i>t</i> (min.) | 0 | 10 | 13 | 14 | / | / |
| <i>I</i> (A) | 16 | 15,8 | 15,7 * | ** | / | / |
| <i>U</i> (V) | 0,0778 | 1,934 | 46,9 | / | / | / |
| <i>R</i> (Ω) | 0,005 | 0,122 | 2,987 | / | / | / |
| <i>T</i> (°C) | 28 | 90 | >385 | / | / | / |

Табела 15. Резултати мерења за комбинацију електрода бакар–месинг и површину преклапања од 15% (површина попречног пресека: 2,5 mm²)

| | | | | |
|------------------------|--------|--------|-------|----|
| <i>t</i> (min.) | 0 | 10 | 12 | 14 |
| <i>I</i> (A) | 10,0 | 9,9 | 9,7 * | ** |
| <i>U</i> (V) | 0,0231 | 1,029 | 70,5 | / |
| <i>R</i> (Ω) | 0,002 | 0,104 | 7,268 | / |
| <i>T</i> (°C) | 28 | 70 | >385 | / |
| <i>t</i> (min.) | 0 | 8 | 9 | / |
| <i>I</i> (A) | 13,1 | 13,0 * | ** | / |
| <i>U</i> (V) | 0,0936 | 96 | / | / |
| <i>R</i> (Ω) | 0,007 | 7,385 | / | / |
| <i>T</i> (°C) | 28 | >385 | / | / |
| <i>t</i> (min.) | 0 | 5 | 6 | / |
| <i>I</i> (A) | 16 | 15,8 * | ** | / |
| <i>U</i> (V) | 0,1342 | 98,8 | / | / |
| <i>R</i> (Ω) | 0,008 | 6,253 | / | / |
| <i>T</i> (°C) | 28 | >385 | / | / |

Табела 16. Резултати мерења за комбинацију електрода бакар–нерђајући челик и површину преклапања од 100%, (површина попречног пресека: 1,5 mm²)

| | | | | | | | |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <i>t</i> (min.) | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| <i>I</i> (A) | 8 | 8,0 | 7,9 | 7,9 | 7,9 | 7,9 | 7,9 |
| <i>U</i> (V) | 0,337 | 1,161 | 1,485 | 2,269 | 2,715 | 3,120 | 3,350 |
| <i>R</i> (Ω) | 0,042 | 0,145 | 0,188 | 0,287 | 0,344 | 0,395 | 0,424 |
| <i>T</i> (°C) | 27 | 108 | 170 | 212 | 238 | 274 | 315 |
| <i>t</i> (min.) | 0 | 10 | 20 | 27 | 29 | / | / |
| <i>I</i> (A) | 10,2 | 10,2 | 10,2 | 10,2* | ** | / | / |
| <i>U</i> (V) | 0,252 | 1,222 | 1,623 | 2,605 | / | / | / |
| <i>R</i> (Ω) | 0,025 | 0,120 | 0,159 | 0,255 | / | / | / |
| <i>T</i> (°C) | 28 | 169 | 192 | >385 | / | / | / |

Табела 17. Резултати мерења за комбинацију електрода бакар–нерђајући челик и површину преклапања од 50% (површина попречног пресека: 1,5 mm²)

| | | | | | |
|-----------------|-------|-------|-------|--------|----|
| <i>t</i> (min.) | 0 | 10 | 20 | 28 | 29 |
| <i>I</i> (A) | 8 | 8 | 8 | 7,9 * | ** |
| <i>U</i> (V) | 0,307 | 1,195 | 1,477 | 2,45 | / |
| <i>R</i> (Ω) | 0,038 | 0,149 | 0,185 | 0,310 | / |
| <i>T</i> (°C) | 28 | 148 | 176 | >385 | / |
| <i>t</i> (min.) | 0 | 10 | 20 | 23 | 24 |
| <i>I</i> (A) | 10,1 | 10,0 | 10,0 | 10,0 * | ** |
| <i>U</i> (V) | 0,295 | 1,123 | 1,649 | 2,230 | / |
| <i>R</i> (Ω) | 0,029 | 0,112 | 0,165 | 0,223 | / |
| <i>T</i> (°C) | 28 | 172 | 216 | >385 | / |

Табела 18. Резултати мерења за комбинацију електрода бакар–нерђајући челик и површину преклапања од 15% (површина попречног пресека: 1,5 mm²)

| | | | | |
|-----------------|-------|-------|-------|----|
| <i>t</i> (min.) | 0 | 10 | 17 | 19 |
| <i>I</i> (A) | 8 | 8 | 7,9 * | ** |
| <i>U</i> (V) | 0,37 | 0,93 | 1,992 | / |
| <i>R</i> (Ω) | 0,046 | 0,116 | 0,252 | / |
| <i>T</i> (°C) | 29 | 190 | >385 | / |
| <i>t</i> (min.) | 0 | 10 | 13 | 14 |
| <i>I</i> (A) | 10 | 10 | 9,9 * | ** |
| <i>U</i> (V) | 0,246 | 1,381 | 2,25 | / |
| <i>R</i> (Ω) | 0,025 | 0,138 | 0,227 | / |
| <i>T</i> (°C) | 30 | 198 | >385 | / |

2.2.1 Комбинација електрода бакар–бакар

Сређени резултати мерења за комбинацију електрода бакар–бакар приказани су у табелама 1–9 из Прилога 2.

Анализирајући резултате мерења који се односе на све разматране површине преклапања две електроде израђене од бакра (100%, 50% и 15%), на све разматране површине попречног пресека електрода (1,5 mm², 2,5 mm² и 4 mm²) и на одговарајуће струје оптерећења (у распону од 8 А до 25 А), утврђено је да је максимална измерена температура контакта 78 °C (за површину попречног пресека 2,5 mm², најмању површину преклапања електрода (15%) и максималну јачину струје за ову површину попречног пресека (16 А) – случај приказан у табели 12 овог поглавља).

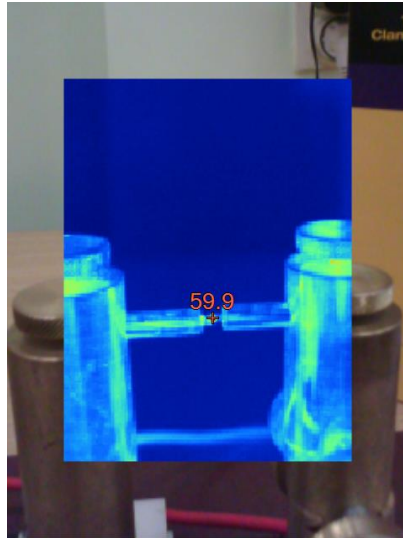
Максимална температура контакта за површину попречног пресека електрода од 1,5 mm² (за површину преклапања електрода од 15% и максималну јачину струје од 10 А) износила је 77 °C, а за површину попречног пресека електрода од 4 mm² (за површину преклапања електрода од 15% и јачину струје од 25 А) 50 °C (видети табеле 3 и 9 из Прилога 2). Током експеримената са овом комбинацијом електрода није било „врелих“ тачака, варница или

континуалног/прекидног редног електричног лука. Отпорност контакта за све разматране случајеве електрода бакар–бакар варира је у опсегу 2–73 mΩ. Табеле 11 и 12 овог поглавља показују да температура контакта није достигла стационарну вредност у временском интервалу од једног сата. Због тога су били извршени додатни експерименти који су показали да је температура контакта практично достигла стационарну вредност у року од три сата (видети, на пример, табелу 19 која се односи на комбинацију електрода бакар–бакар). Опет није било „врелих“ тачака, варница нити електричног лука.

Табела 19. Резултати додатних мерења за комбинацију електрода бакар–бакар и површину преклапања од 15% (површина попречног пресека: 2,5 mm²)

| | | | | | | |
|----------------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <i>t</i> (h) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| <i>I</i> (A) | 10 | 9,9 | 9,9 | 9,9 | 9,9 | 9,9 |
| <i>U</i> (V) | 0,0319 | 0,739 | 0,795 | 0,811 | 0,828 | 0,847 |
| <i>R</i> (Ω) | 0,003 | 0,075 | 0,080 | 0,082 | 0,084 | 0,086 |
| <i>T</i> (°C) | 27 | 73 | 74 | 75 | 75 | 75 |
| <i>t</i> (h) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| <i>I</i> (A) | 13 | 13 | 12,9 | 12,9 | 12,9 | 12,9 |
| <i>U</i> (V) | 0,0374 | 0,847 | 0,861 | 0,875 | 0,884 | 0,896 |
| <i>R</i> (Ω) | 0,003 | 0,065 | 0,067 | 0,068 | 0,069 | 0,069 |
| <i>T</i> (°C) | 26 | 76 | 77 | 78 | 78 | 78 |
| <i>t</i> (h) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| <i>I</i> (A) | 16,1 | 16,0 | 16,0 | 16,0 | 16,0 | 16,0 |
| <i>U</i> (V) | 0,0324 | 0,852 | 0,864 | 0,879 | 0,892 | 0,915 |
| <i>R</i> (Ω) | 0,002 | 0,053 | 0,054 | 0,055 | 0,056 | 0,057 |
| <i>T</i> (°C) | 27 | 78 | 80 | 81 | 82 | 82 |

Као илустрација тока експеримента на слици 32 приказана је термовизијска слика снимљена при извођењу експеримента са бакарним електродама (површина попречног пресека је била 2,5 mm², површина преклапања 15% и јачина струје 10 A).



Слика 32. Пример термовизијске слике за случај обе бакарне електроде

2.2.2 Комбинација електрода бакар–месинг

Сређени резултати мерења за комбинацију електрода бакар–месинг (једну од најчешћих комбинација материјала која се среће у пракси на прикључним елементима електроинсталационих компоненти) приказани су у табелама 10–18 из Прилога 2.

2.2.2.1 Површина преклапања електрода од 100%

Резултати мерења за површину преклапања електрода бакар–месинг од 100% показали су да је максимална температура контакта 75 °C (за површину пресека електроде 4 mm² и јачину струје од 25 A). Сличне максималне температуре, 73 °C и 72 °C, измерене су редом за површине попречног пресека електрода 2,5 mm² и 1,5 mm² (редом табеле 13 и 10 из Прилога 2). Отпорност контакта је припадала опсегу 2–145 mΩ.

Резултати приказани у табели 13 овог поглавља показују да у неким случајевима температура контакта није достигла стационарну вредност током иницијалних експеримената који су трајали сат времена. Табела 20, која се односи на комбинацију електрода бакар–месинг, такође потврђује (као и у случају комбинације електрода бакар–бакар) да се у тим случајевима стационарна температура контакта практично достиже у временском интервалу од три сата. Опет није било „врелих“ тачака, варница нити електричног лука.

Табела 20. Резултати додатних мерења за комбинацију електрода бакар–месинг и површину преклапања од 100% (површина попречног пресека: 2,5 mm²)

| | | | | | | |
|---------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <i>t</i> (h) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| <i>I</i> (A) | 10 | 10 | 10 | 10 | 9,9 | 9,9 |
| <i>U</i> (V) | 0,0263 | 0,578 | 0,679 | 0,726 | 0,839 | 0,945 |
| <i>R</i> (Ω) | 0,003 | 0,058 | 0,068 | 0,073 | 0,085 | 0,095 |
| <i>T</i> (°C) | 26 | 52 | 55 | 56 | 56 | 56 |
| <i>t</i> (h) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| <i>I</i> (A) | 13,1 | 13,1 | 13,1 | 13,1 | 13,0 | 13,0 |
| <i>U</i> (V) | 0,0786 | 0,895 | 0,914 | 1,115 | 1,186 | 1,210 |
| <i>R</i> (Ω) | 0,006 | 0,068 | 0,070 | 0,085 | 0,091 | 0,093 |
| <i>T</i> (°C) | 27 | 70 | 72 | 72 | 73 | 73 |
| <i>t</i> (h) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| <i>I</i> (A) | 16 | 16 | 16 | 16 | 15,9 | 15,9 |
| <i>U</i> (V) | 0,0928 | 1,082 | 1,125 | 1,217 | 1,241 | 1,255 |
| <i>R</i> (Ω) | 0,006 | 0,068 | 0,070 | 0,076 | 0,078 | 0,079 |
| <i>T</i> (°C) | 27 | 73 | 83 | 87 | 88 | 88 |

2.2.2.2 Површина преклапања електрода од 50%

За површину попречног пресека електрода од 2,5 mm² и минималну јачину струје за овај пресек (10 A), температура контакта је прилично брзо премашила 385 °C (максимална температура која се може измерити термовизијском камером), а убрзо након тога (за око десет секунди) формиран је редни електрични лук (видети табеле 11, 14 и 17 у Прилогу 2). Као што се и очекивало, при истој јачини струје брже се формирао електрични лук за мање површине попречног пресека (на пример, при јачини струје од 16 A, у 13. минути од почетка експеримента формиран је електрични лук када је попречни пресек био 2,5 mm², а у 43. минути када је површина попречног пресека износила 4 mm²). Констатовано је и следеће: за исту површину попречног пресека електрода електрични лук је настао брже за веће јачине струје (на пример, када је попречни пресек био 2,5 mm², електрични лук је успостављен после 35 минута при јачини струје од 10 A, а након 13 минута за јачину струје од 16 A – видети табелу 14 из овог поглавља). По правилу, електрични лук је горео неколико минута, након чега би се трајно угасио и прекинуо струјно коло. Измерена је температура контакта од око 700 °C (помоћу термопара) непосредно пре успостављања редног електричног лука. Отпорност контакта је достигла максималну вредност од 3,114 Ω (непосредно пре тога је успостављен редни електрични лук) за површину попречног пресека од 1,5 mm² при јачини струје од 8 A. Донекле ниже

максималне отпорности контакта добијене су за попречне пресеке електрода од $2,5 \text{ mm}^2$ (2,625–2,987 Ω) и 4 mm^2 (2,430–2,884 Ω), које су измерене непосредно после успостављања редног електричног лука.

2.2.2.3 Површина преклапања електрода од 15%

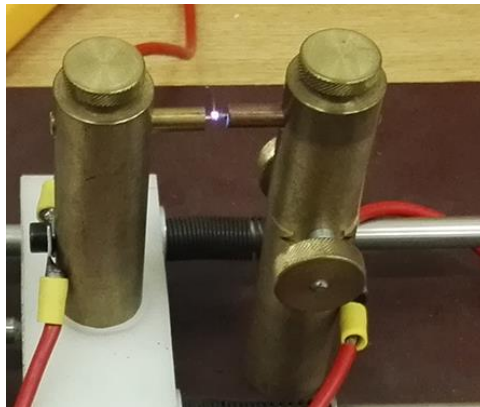
Лако се уочава да се за површине преклапања електрода од 15% висока температура контакта и редни електрични лук успостављају брже него када су површине преклапања биле веће (на пример, за површину попречног пресека од $1,5 \text{ mm}^2$ и јачину струје од 10 А, редни електрични лук је почео да гори само четири минута од почетка експеримента) – видети табеле 12, 15 и 18 из Прилога 2. Отпорност контакта је достигла максималну вредност од 7,385 Ω за попречни пресек електрода од $2,5 \text{ mm}^2$ и јачину струје од 13 А (са успостављеним електричним луком и напоном између електрода од чак 96 V) – видети табелу 15 из овог поглавља. За површину попречног пресека од $1,5 \text{ mm}^2$ отпорност контакта је била у опсегу 3,250–3,457 Ω , док је за површину попречног пресека од 4 mm^2 вредност отпорности контакта била најмања, у опсегу 1,091–2,733 Ω (све вредности су измерене непосредно после успостављања редног електричног лука).

Треба напоменути да се брзо повећање напона између бакарне и месингане електроде догодило тренутно, пошто је успостављен редни електрични лук (видети табелу 15 из овог поглавља).

Као илустрација тока експеримента, на слици 33 приказана је термовизијска слика снимљена при извођењу експеримента са електродама бакар–месинг, док је на слици 34 приказан електрични лук успостављен између електрода бакар–месинг (површина попречног пресека је била $2,5 \text{ mm}^2$, површина преклапања 15% и јачина струје 16 А).



Слика 33. Пример термовизијске слике „вреле“ тачке за комбинацију електрода бакар–месинг



Слика 34. Тренутак када је успостављен редни електрични лук при лошем електричном контакту електрода бакар–месинг

2.2.3 Комбинација електрода бакар–нерђајући челик

Сређени резултати мерења за комбинацију електрода бакар–нерђајући челик приказани су у табелама 19–27 из Прилога 2.

2.2.3.1 Површина преклапања електрода од 100%

Типично за све експерименте извршене са комбинацијом електрода бакар–нерђајући челик, за све попречне пресеке електрода ($1,5 \text{ mm}^2$, $2,5 \text{ mm}^2$ и 4 mm^2) и при минималним одговарајућим струјама (редом 8 А, 10 А и 16 А), јесте да су се успоставиле врло високе температуре контакта (које припадају опсегу 265–315 °С) чак и са површинама преклапања од 100% (видети табелу 16 из овог поглавља, као и табеле 22 и 25 из Прилога 2). За већу јачину струје (10 А за попречни пресек $1,5 \text{ mm}^2$, 13 А и 16 А за попречни пресек $2,5 \text{ mm}^2$, односно 20 А

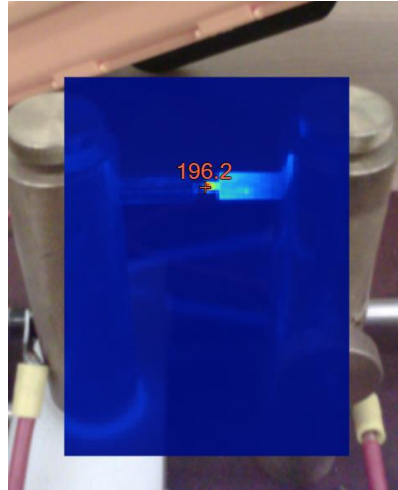
и 25 А за попречни пресек 4 mm²), иако је површина преклапања била 100%, „вреле“ тачке су се брзо успоставиле (са температуром од приближно 700 °С), а после само неколико секунди почео је да гори редни електрични лук. Електрични лук је стабилно горео неколико минута, након чега се трајно угасио, прекидајући струјно коло. Треба напоменути да је за ову комбинацију електрода максимална температура контакта била лоцирана на врху електроде од нерђајућег челика (видети пример термовизијског снимка приказан на слици 35), што се могло видети и голим оком (врх електроде од нерђајућег челика емитовао је бљесак јарко наранџасте боје). Разлог за ову појаву највероватније лежи у чињеници да је топлотна проводност челика скоро 4 пута мања од топлотне проводности бабра. На срећу, ако се успостави добар контакт (чврст контакт са површином преклапања од 100%), такве „вреле“ тачке се не појављују у пракси, јер је површина преклапања између бакарног проводника и прикључног дела електроинсталационе компоненте (нпр. завртња шуко-утичнице израђеног од нерђајућег челика) знатно већа од 4 mm² (колико је износила максимална површина контакта у изведеним експериментима). Отпорност контакта за све посматране случајеве била је у опсегу 21–424 mΩ (максималне вредности су биле отприлике три пута веће од оних добијених за комбинацију електрода бакар–месинг за исту површину преклапања – 100%).

2.2.3.2 Површина преклапања електрода од 50%

Резултати мерења који се односе на површину преклапања електрода од 50% такође су показали да је температура контакта брзо премашила температуру од 385 °С, а да је после пар десетина секунди успостављано стабилно горење редног електричног лука – видети табелу 17 из овог поглавља, као и табеле 23 и 26 из Прилога 2. По правилу, електрични лук је остао стабилан неколико минута, након чега се трајно гасио, прекидајући струјно коло (у неким случајевима је трајао неколико минута дуже него у одговарајућим случајевима за комбинацију електрода бакар–месинг). Отпорност контакта је достигла максимум од 317 mΩ (када је успостављен редни електрични лук) са електродама површине попречног пресека 2,5 mm² и јачином струје од 10 А. Ова отпорност је знатно нижа од

максималне отпорности контакта која карактерише комбинацију електрода бакар–месинг (3,114 Ω).

Као илустрација тока експеримента, на слици 35 је приказана термовизијска слика експеримента са електродама од бабра и нерђајућег челика (површина попречног пресека је била 2,5 mm², површина преклапања 50% и јачина струје 10 А).



Слика 35. Пример термовизијске слике „вреле“ тачке за комбинацију електрода бакар–нерђајући челик

2.2.3.3 Површина преклапања електрода од 15%

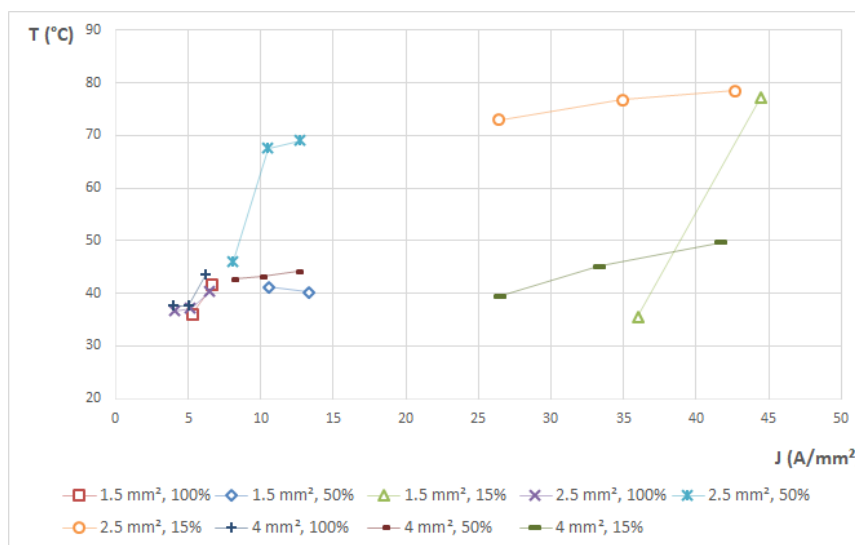
У свим анализираним случајевима „врела“ тачка је брзо формирана, а затим брзо прешла у горење редног електричног лука (на пример, за површину попречног пресека електрода од 1,5 mm² лук је почео да гори у 17. минути при јачини струје од 8 А, а у 13. минути при јачини струје од 10 А – видети табелу 18). После отприлике три минута стабилног горења, редни електрични лук се трајно угасио. Максимална отпорност контакта је износила 0,324 Ω , а постигнута је за површину попречног пресека електрода од 2,5 mm² и јачину струје од 10 А (са успостављеним редним електричним луком). Током стабилног горења редног електричног лука, успостављени су знатно нижи напони (који припадају уском опсегу 1,992–3,230 V) него у случају комбинације електрода бакар–месинг. Напон између бакарне електроде и електроде од нерђајућег челика није значајно промењен у моменту када је редни електрични лук био успостављен (видети

табеле 16–18 из овог поглавља), што није био случај са комбинацијом електрода бакар–месинг (видети табеле 14 и 15 из овог поглавља).

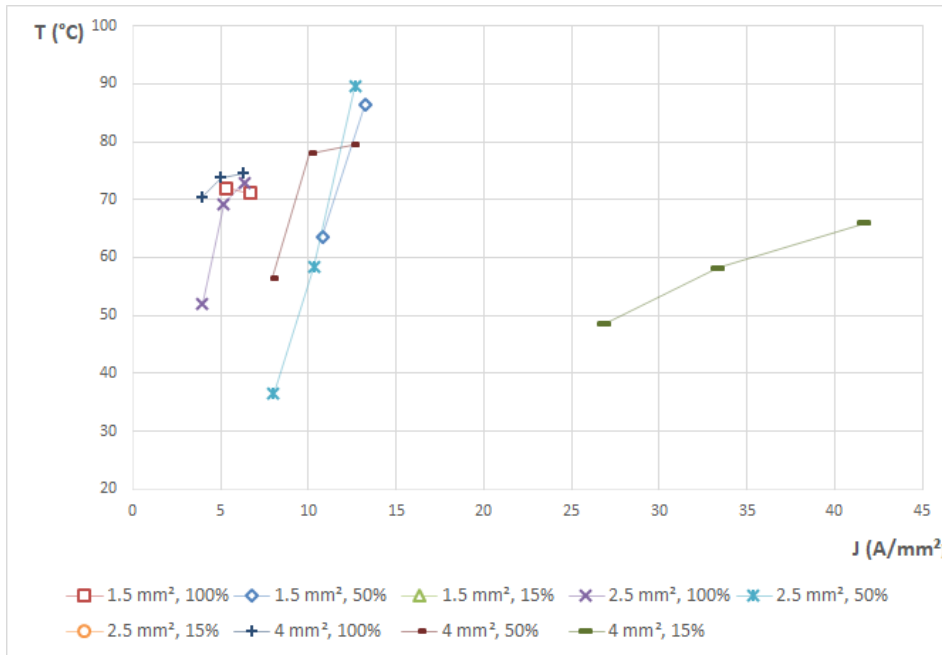
2.2.4 Визуелна презентација резултата истраживања

Ради боље (визуелне) презентације резултата експеримента, на сликама 36–38 дати су графици који показују зависност између температуре контакта T и густине струје J (рачунате као однос јачине струје и ефективне површине контакта – 15%, 50% или 100% од пресека електрода), за све разматране комбинације материјала електрода, попречних пресека, процената преклапања површина електрода и јачине струја (на основу резултата свих мерења представљених у 27 табела Прилога 2). У свим разматраним случајевима посматрана је само температура контакта за последњи временски период за који постоје релевантни подаци за све испитиване струје (непосредно пре успостављања редног електричног лука).

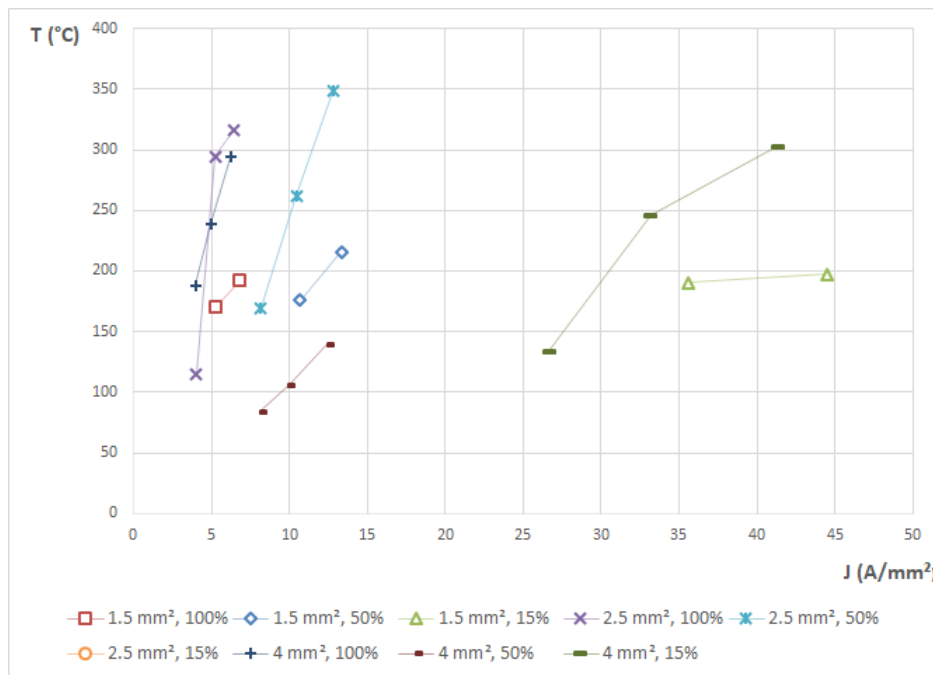
У случајевима када је овај процес трајао довољно дуго, успостављена је јасна веза директне пропорционалности између последње измерене температуре контакта и његове густине струје. Као што се и очекивало, графици показују да комбинацију електрода бакар–нерђајући челик карактерише највећи пораст температуре, а комбинацију електрода бакар–бакар најмањи. Овај закључак важи за оба опсега густине струје (3,9–13,3 A/mm² и 26,4–44,4 A/mm²).



Слика 36. Графици температуре контакта као функција густине струје за комбинацију електрода бакар–бакар



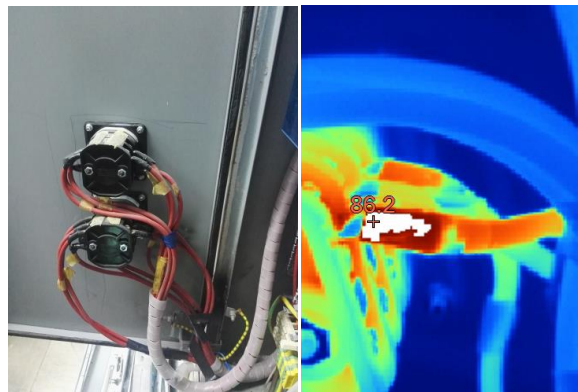
Слика 37. Графици температуре контакта као функција густине струје за комбинацију електрода бакар-месинг



Слика 38. Графици температуре контакта као функција густине струје за комбинацију електрода бакар-нерђајући челик

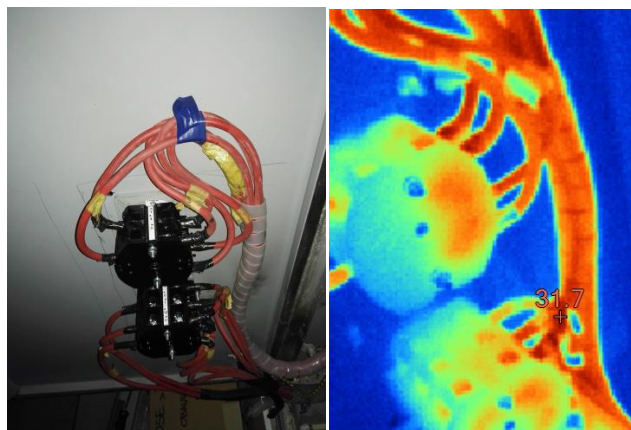
2.2.5 Пример из праксе

Практичан значај експерименталног рада представљеног у овом поглављу биће илустрован следећим примером. Редовним периодичним термовизијским испитивањем разводних ормана у сервер сали рачунарског центра Електротехничког факултета Универзитета у Београду, детектована је „врела“ тачка (температуре око 86 °С) на једном од прикључака главног прекидача (називне струје 63 А). Слика прекидача и одговарајућа термовизијска слика приказане су на слици 39.



Слика 39. Главни прекидач (лево) и одговарајућа трмовизијска слика (десно)

Након интервенције електричара и притезања завртња на контакту, температура контакта је остала скоро иста. Због тога је главни прекидач замењен новим, чиме је елиминисана „врела“ тачка (под истим оптерећењем максимална измерена температура контакта износила је око 32 °С – видети слику 40).



Слика 40. Нови главни прекидач (лево) и одговарајућа термовизијска слика (десно)

Проблематичан прекидач је накнадно отворен како би се открило шта је проузроковало стално прегревање једног његовог прикључног контакта. Детектовано је непотпуно приањање бакарних плочица које формирају електрични контакт, узроковано механичком деформацијом и нараслим оксидационим слојем на једној од њих. Делови бакарних плочица са значајно смањеном ефективном површином преклапања када је прекидач укључен могу се видети као тамне тачке које су приказане стрелицама на слици 41 (нарасли оксидациони слој је постојао на десној бакарној плочици).



Слика 41. Делови главног прекидача са смањеном површином преклапања бакарних плочица

2.2.6 Закључци

Циљ првог експерименталног истраживања био је утврђивање топлотних ефеката лоших електричних контаката узрокованих смањењем ефективне површине преклапања контактних површина. Анализиране су најчешће примењене комбинације материјала који се користе за електричне контакте (бакар–бакар, бакар–месинг и бакар–нерђајући челик). Разматране су различите површине попречног пресека испитаних електрода ($1,5 \text{ mm}^2$, $2,5 \text{ mm}^2$ и 4 mm^2), као и различите струје оптерећења контакта.

Анализа која је била посвећена лошим електричним контактима који се јављају на новим нисконапонским електричним инсталацијама (сваки експеримент је извршен са новим електродама), показала је да контакт бакар–бакар има најповољније особине у односу на достигнуту температуру контакта. Без обзира на јачину струје, попречни пресек и површину преклапања електрода које су коришћене у извршеним експериментима, температура контакта бакар–бакар била је знатно нижа него код комбинација електрода бакар–месинг и бакар–нерђајући челик. У критичном случају за контакт бакар–бакар (површина попречног пресека електроде од $2,5 \text{ mm}^2$, површина преклапања од 15% и јачина

струје од 16 А), максимална измерена температура контакта износила је 78 °С. Важно је напоменути да само у експериментима са бакарним електродама није долазило до варничења или горења редног електричног лука.

Експерименти са електродама бакар–месинг и бакар–нерђајући челик одликују се појавом „врелих“ тачака, а потом и редног електричног лука у свим случајевима њиховог непотпуног преклапања (површине преклапања од 15% и 50% у спроведеном експерименталном истраживању). Приметно је да је комбинација електрода бакар–нерђајући челик најопаснија као потенцијални узрок пожара, јер се чак и у случајевима када је површина преклапања електрода 100% (за све разматране површине попречног пресека електрода) успоставља висока температура контакта која је била у опсегу 265–315 °С. Срећом, у пракси, ефективне површине контакта између бакарног проводника и прикључка на електроинсталационим компонентама најчешће знатно премашују максималан пресек проводника коришћених у спроведеним експериментима (4 mm²). Такође, честа је појава да се управо због тога врши никловање челичних контактних површина, како би се поправиле термичке особине тако оствареног контакта са бакарним проводником.

Анализирајући отпорности контакта које су измерене за све комбинације материјала електрода, све разматране попречне пресеке и површине преклапања, као и за разне струје оптерећења, може се закључити да су њихове максималне вредности највеће у случају контакта бакар–месинг (7,385 Ω). У случају контакта бакар–бакар, оне су око 100 пута мање (73 mΩ), док су за комбинацију електрода бакар–нерђајући челик око 23 пута мање (0.324 Ω). Важно је напоменути да је максимална отпорност контакта бакар–месинг и бакар–нерђајући челик била измерена током стабилног горења редног електричног лука, што није био случај са контактом бакар–бакар (јер су у том случају температуре контакта биле знатно ниже при истим условима и није долазило до појаве редног електричног лука). Највећа отпорност контакта измерена у случају контакта бакар–месинг довела је до тренутног повећања напона (до скоро 100 V), које се десило између електрода у тренутку када је успостављен стабилан редни електрични лук. То није био случај са контактима бакар–нерђајући челик, где напон није био већи од неколико волти чак и када је био успостављен редни електрични лук. Ова појава се

објашњава постојањем зависности између напона електричног лука и врсте материјала електрода, састава гасне средине и температура топљења материјала од којих су израђене електроде [22].

Важно је истаћи да је по критеријуму максималне снаге дисипације на „врелој“ тачки опаснија комбинација електрода бакар–нерђајући челик (максимална снага дисипације на овом споју износила је око 63 W, а на споју бакар–месинг око 32 W) – у свим разматраним случајевима поређења су вршена при истој површини попречног пресека електрода, истој ефективној површини преклапања и истој јачини струје. Међутим, када дође до успостављања редног електричног лука, долази до знатног пораста контактне отпорности на споју бакар–месинг (у односу на спој бакар–нерђајући челик, код кога се контактна отпорност при горењу редног електричног лука незнатно повећа). Због тога је снага дисипације на споју бакар–месинг за време горења редног електричног лука знатно већа него на споју бакар–нерђајући челик (минимална вредност за први спој износила је 200 W, а максимална вредност за други спој 65 W).

Као што се и очекивало, уочено је да се, при истим јачинама струје, код контакта бакар–месинг и бакар–нерђајући челик знатно брже долази до успостављања редног електричног лука са електродама мање површине попречног пресека. Такође, електрични лук се много лакше успостављао за већу јачину струје при истој површини попречног пресека.

Чињеница да је цена отпадног бакра у Европи око 46% већа од цене месинга [109] представља очигледан разлог за употребу месинга при изради прикључака електроинсталационих компоненти у нисконапонској електричној инсталацији намењеној масовној употреби (на пример, за израду утикача и утичница). Нажалост, и непримерени прикључци израђени од нерђајућег челика (чија је цена чак пет пута нижа од цене бакра) и даље су присутни на тржишту (то су претежно електроинсталационе компоненте непознатог порекла). Такође треба напоменути да су лабораторијска испитивања показала да се завртњи од поцинкованог угљеничног челика не смеју користити у комбинацији са алуминијумским проводницима због њихове основне металуршке некомпатибилности [108].

Даљи истраживачки рад у оквиру ове докторске дисертације био је усмерен на анализу утицаја редукције момента затезања завртња (на електроинсталационим компонентама) на појаву „врелих“ тачака у новим утикачима и утичницама.

3 ЛОШ КОНТАКТ НАСТАО УСЛЕД РЕДУКЦИЈЕ МОМЕНТА ЗАТЕЗАЊА ЗАВРТЊА НА ПРИКЉУЧНОМ ЕЛЕМЕНТУ ЕЛЕКТРОИНСТАЛАЦИОНЕ КОМПОНЕНТЕ

Ово истраживање обухватило је експерименте са новим шуко-утикачима и утичницама прикљученим на мрежу називног напона 230 V и мрежне фреквенције 50 Hz. Променом момента затезања завртњем изведених прикључака у испитиваним утикачима и утичницама, као и променом јачине струје и дужине њеног трајања, анализиран је њихов утицај на температуру и електричну отпорност контакта. Лицнасти бакарни проводници са стандардним попречним пресеком од 1,5 mm² и 2,5 mm² коришћени су у шуко-утикачима, а бакарни проводници пуног попречног пресека 1,5 mm² и 2,5 mm² у шуко-утичницама. Променом (редукцијом) момента затезања на завртњем изведеним прикључцима, експериментално су симулирани лоши електрични контакти на прикључцима узроковани микровибрацијама околине или непрофесионалним радом од стране електроинсталатера. Такође, нека испитивања су намерно трајала дуже од 8 сати (до 17 сати), како би се испитао закључак из [76] да је у већини случајева температура завртњем изведеног прикључка постигнута у року од једног сата била температура стационарног стања (иницијална испитивања у референци [76] трајала су 8 сати). Ниже температуре лошег контакта, до 385 °C, праћене су термовизијском камером. Ласерски термометар (опсега мерења температуре до 900 °C) користио се за мерење високих температура прегрејаних контаката („врелих“ тачака).

3.1 Поставка експеримента

Да би се анализирали ефекти редукције момента затезања на загревање завртњем изведених прикључака у утикачима и утичницама, симулирани су лоши контакти, а сви експерименти су изведени у Лабораторији за испитивање нисконапонских електричних и громобранских заштитних инсталација на Електротехничком факултету Универзитета у Београду. Узорци утикача и утичница коришћених у овим експериментима, али без њихових пластичних кућишта, приказани су на слици 42.



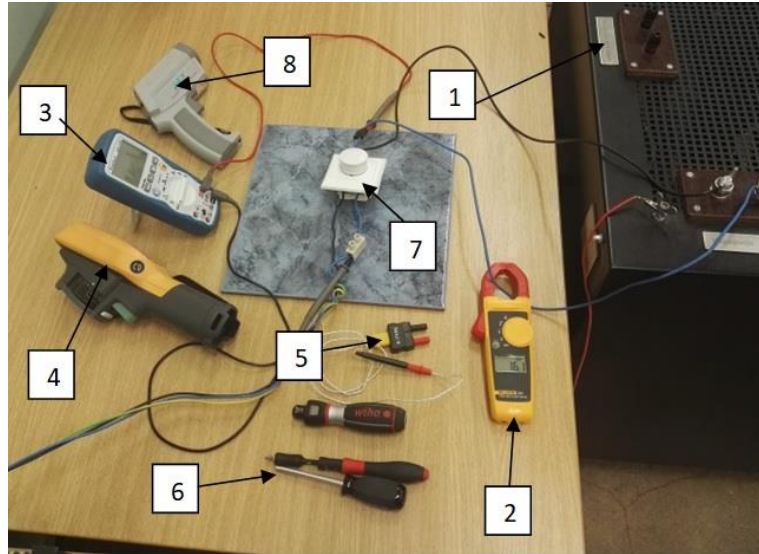
Слика 42. Снимак тела утикача (лево) и утичнице (десно) коришћених у експерименту

Према стандарду [110], утикачи и утичнице коришћени у овом експерименту били су типа *F* (редом *CEE 7/4* и *CEE 7/3*), који се широко користе у Европи и Русији (изузети су Велика Британија и Ирска). Оба поседују стандардне типове завртњем изведених прикључака, описане у [87]: тип *M3* у утикачу и тип *M4* у утичници. Прикључци у испитиваним утикачима и утичницама израђени су редом од никлованог месинга и чистог месинга (без било каквих заштитних легура). Иако се контактни притисак не може прецизно мерити и подешавати, момент затезања завртња може, као што је то учињено у [74–76]. Према одговарајућем стандарду [100], минимални моменти затезања које треба применити на завртњем изведене прикључке у испитиваним типовима утикача и утичница су редом 0,5 Nm и 0,8 Nm. Коришћењем механичког „момент-шрафцигера“ (*Wiha Torque Vario-C26462*, са мерним опсегом 0,5–2,0 Nm и прецизношћу од $\pm 6\%$), на једном од два завртњем изведена прикључка у испитиваним утикачима и утичницама, момент затезања је увек бивао подешен на 1 Nm (чиме је практично остварен одличан контакт).

Три различита момента затезања (1 Nm (одличан контакт), 0,2 Nm (лош контакт) и 0,1 Nm (врло лош контакт)) подешавана су на другом завртњем изведеном прикључку. За подешавање момента од 0,2 Nm и 0,1 Nm коришћен је дигитални „момент-шрафцигер“ (*TSD-50*, са мерним опсегом 0,05–0,5 Nm и тачношћу $\pm 2\%$ у смеру казаљке на сату и $\pm 3\%$ у супротном смеру од смера казаљке на сату). У свим случајевима (независно од типа коришћеног „момент-шрафцигера“) вршено је суво стезање (без употребе било каквих лубриканата). Прво би се вредност жељеног момента затезања подесила на примењеном „момент-шрафцигеру“. Чим би се постигао подешени момент затезања, као последица начина рада „шрафцигера“, стезање завртња би се завршило обртним

проклизавањем „момент-шрафцигера“. Експериментална поставка је била направљена тако да обезбеди да бакарни проводник буде на месту прикључка притиснут само подешеним моментом затезања на „момент-шрафцигеру“. Као што је већ напоменуто, лицнасти бакарни проводници стандардног попречног пресека од $1,5 \text{ mm}^2$ и $2,5 \text{ mm}^2$ коришћени су у утикачима, а бакарни проводници пуног пресека од $1,5 \text{ mm}^2$ и $2,5 \text{ mm}^2$ у утичницама. Струје у одговарајућим струјним колима изабране су да буду 8 А, 13 А и 16 А.

У овом истраживању је коришћена експериментална поставка која је била практично иста са оном коришћеном за анализу лоших контаката узрокованих непотпуним преклапањем између бакарног проводника и прикључка на електроинсталационој компоненти, која је детаљно описана у поглављу 2. Једина разлика била је у томе што је специјално пројектована апаратура која је симулирала лош контакт између електрода замењена утикачем (утичницом) који је садржао намерно изазван лош електрични контакт (слика 43). Испитивања су изведена при називном напону од 230 V и при мрежној фреквенцији од 50 Hz. Струја (оптерећења) је подешавана помоћу отпорничке декадне кутије 230 V, 60 А. Температуре контаката су мерене помоћу термовизијске камере (Fluke Ti125, чија је тачност $\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ или $\pm 2\%$ [107]). Пошто је максимална температура која се може мерити помоћу ове термовизијске камере $385 \text{ }^\circ\text{C}$, температуре контаката веће од $385 \text{ }^\circ\text{C}$ мерене су помоћу ласерског термометра (*Cole-Parmer*), за разлику од првог истраживања када су мерене термопаром. Пре почетка експеримента термовизијска камера и ласерски термометар су калибрисани помоћу сонде термопара типа К хромел/алумел (додатак *PeakTech 3360*), намењене за мерење температура до $1260 \text{ }^\circ\text{C}$, са тачношћу од $\pm 1,1 \text{ }^\circ\text{C}$ или 0,4%. Резултати мерења извршених приликом калибрације термовизијске камере и ласерског мерача температуре приказани су у табелама 21 и 22.



Слика 43. Експериментална поставка за анализу ефекта редукације момента затезања завртња на загревање електричних контаката у утикачима и утичницама (1. отпорничка кутија, 2. струјна клешта, 3. мултиметар (прецизан волтметар), 4. термовизијска камера, 5. термопар, 6. дигитални и механички „момент-шрафцигери“, 7. испитивана утичница или утикач, 8. ласерски мерач температуре)

Табела 21. Резултати калибрације термовизијске камере *Fluke Ti125*

| Референта температура | <i>Fluke Ti 125</i> | | |
|-----------------------|------------------------------------|-----|-----|
| | Коефицијент емисивности ϵ | | |
| Термопар | 0,7 | 0,8 | 0,9 |
| 50 | 55 | 47 | 39 |
| 100 | 106 | 98 | 87 |
| 150 | 163 | 146 | 135 |
| 200 | 217 | 198 | 180 |
| 250 | 267 | 255 | 231 |
| 300 | 326 | 309 | 277 |
| 350 | 379 | 363 | 338 |

Табела 22. Резултати калибрације ласерског мерача температуре *Cole-Parmer*

| Референта температура | <i>Infra red Cole-Parmer</i> | | | |
|-----------------------|------------------------------------|-----|-----|------|
| | Коефицијент емисивности ϵ | | | |
| Термопар | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 0,95 |
| 400 | 435 | 415 | 389 | / |
| 450 | 512 | 467 | 440 | / |
| 500 | 563 | 519 | 491 | / |
| 550 | 589 | 565 | 542 | / |
| 600 | 649 | 623 | 593 | / |
| 650 | 712 | 674 | 644 | / |
| 700 | 787 | 736 | 695 | / |
| 750 | 823 | 781 | 747 | / |
| 800 | 917 | 846 | 810 | 789 |
| 850 | 946 | 913 | 867 | 849 |

У овом истраживању је било могуће мерити само температуру главе никлованог завртња на месту контакта, израђеног од нерђајућег челика, јер је она

представљала најпогоднији део лошег контакта на утикачима и утичницама за снимање термовизијском камером (или мерење ласерским термометром). Утврђено је да коефицијент емисивности површине главе завртња расте са порастом температуре, због чега је он морао да се подеси на термовизијској камери (на вредност 0,8 за мерене температуре до 350 °С) и на ласерском термометру (на вредности 0,85, 0,90 и 0,95 редом за температурне опсеге 350–550 °С, 550–800 °С и 800–900 °С). Провере су показале да су, коришћењем наведених подешавања, измерене температуре (помоћу термовизијске камере и ласерског термометара) одступале мање од 4% од оних добијених мерењима помоћу референтног термопара.

Током сваког мерења температуре контакта, електрична отпорност контакта такође је мерена (помоћу $U-I$ методе). Струја и напон су мерени струјним клештима (*Fluke 323*), односно дигиталним мултиметром (*PeakTech 3360*).

Укупан број извршених експеримената износио је 41 (њихови улазни параметри су приказани у табели 23). Урађене су две групе (серије) експеримената и финални експеримент. У првој серији експеримената, који су трајали по 60 минута, није се успостављало горење редног електричног лука. У другој серији експеримената, који су најдуже трајали, намерно је допуштено да лош електрични контакт пређе у стабилан редни електрични лук, који је потом био прекидан. У финалном експерименту је било важно да се предвиди када ће доћи до успостављања редног електричног лука, јер су се тада експерименти намерно прекидали како би се спречило успостављање редног електричног лука. Предвиђање настанка редног лука било је засновано на следећим манифестацијама: звучни ефекат пуцкетања на месту контакта, визуелни ефекат варница на контакту, изненадно повећање температуре контакта (које не може да се измери нити термовизијском камером нити ласерским термометром, јер је изван њихових мерних температурних опсега), као и нагли пораст отпорности контакта и њене брзе (динамичне) промене у времену.

Табела 23. Извршена испитивања и улазни параметри

| | <i>Прва серија</i> | <i>Друга серија</i> | <i>Финални експеримент</i> |
|-----------------------------------|--|--|--|
| Број испитаних: | | | |
| - утикача | 18 | 2 | / |
| - утичница | 18 | 2 | 1 |
| Тип проводника у: | | | |
| - утикачима | лицнасти | лицнасти | / |
| - утичницама | пун пресек | пун пресек | пун пресек |
| Попречни пресек проводника | 1,5 mm ² 2,5 mm ² | 1,5 mm ² 2,5 mm ² | 2,5 mm ² |
| Момент затезања | 0,1-1 Nm | 0,1 Nm | 0,1 Nm |
| Јачина струје | 8-16 А | 16 А | 16 А |
| Трајање | 1 сат | до настанка електричног лука и његовог прекида | понављање грејања и хлађења завртња до тачке која претходи настанку електричног лука |

3.2 Резултати мерења и дискусија

Комплетни резултати мерења, који показују ефекте редукције момента затезања на загревање електричних контаката у утикачима и утичницама, представљени су у 20 табела датих у Прилогу 3. Треба напоменути да је у свим тим експериментима мерена температура главе никлованог контактеног завртња (и на утичници и на утикачу) уместо температуре контакта. Због тога можемо да сматрамо да су стварне температуре контакта биле нешто веће од измерених.

3.2.1 Прва серија експеримената

Комплетни резултати мерења у првој серији експеримената (представљени у 12 табела) приказани су у Прилогу 3 (део А). Анализирајући резултате мерења који се односе на свих 36 изведених испитивања (резултати добијени у 12 од 36 испитивања дати су у табелама 24-27 као илустрација), примећено је да отпорност контакта није била знатно повећана ни у једном од ових испитивања (била је у опсегу 3–13 mΩ).

Табела 24. Резултати мерења на утикачу (лицнасти проводник (попречни пресек $1,5 \text{ mm}^2$) и јачина струје 8 А)

| <i>Момент затезања = 1 Nm</i> | | | | | | | |
|---------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| <i>t (min.)</i> | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| <i>I (A)</i> | 8,1 | 8,1 | 8,1 | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 8,0 |
| <i>U (mV)</i> | 53 | 64 | 84 | 90 | 83 | 83 | 84 |
| <i>R (mΩ)</i> | 7 | 8 | 10 | 11 | 10 | 10 | 11 |
| <i>T (°C)</i> | 28 | 35 | 38 | 38 | 38 | 38 | 38 |
| <i>Момент затезања = 0,2 Nm</i> | | | | | | | |
| <i>t (min.)</i> | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| <i>I (A)</i> | 8,2 | 8,2 | 8,2 | 8,1 | 8,1 | 8,1 | 8,1 |
| <i>U (mV)</i> | 56 | 58 | 58 | 58 | 57 | 58 | 59 |
| <i>R (mΩ)</i> | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 |
| <i>T (°C)</i> | 28 | 36 | 37 | 38 | 38 | 38 | 38 |
| <i>Момент затезања = 0,1 Nm</i> | | | | | | | |
| <i>t (min.)</i> | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| <i>I (A)</i> | 8,2 | 8,2 | 8,2 | 8,1 | 8,1 | 8,1 | 8,1 |
| <i>U (mV)</i> | 84 | 85 | 86 | 87 | 88 | 88 | 87 |
| <i>R (mΩ)</i> | 10 | 10 | 10 | 11 | 11 | 11 | 11 |
| <i>T (°C)</i> | 28 | 42 | 44 | 44 | 45 | 45 | 45 |

Табела 25. Резултати мерења на утикачу (лицнасти проводник (попречни пресек $2,5 \text{ mm}^2$) и јачина струје 16 А)

| <i>Момент затезања = 1 Nm</i> | | | | | | | |
|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| <i>t (min.)</i> | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| <i>I (A)</i> | 16,1 | 16,1 | 16,1 | 16,1 | 16,1 | 16,1 | 16,1 |
| <i>U (mV)</i> | 46 | 49 | 49 | 49 | 51 | 59 | 60 |
| <i>R (mΩ)</i> | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 |
| <i>T (°C)</i> | 28 | 54 | 56 | 56 | 56 | 57 | 58 |
| <i>Момент затезања = 0,2 Nm</i> | | | | | | | |
| <i>t (min.)</i> | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| <i>I (A)</i> | 16,1 | 16,1 | 16,1 | 16,1 | 16,1 | 16,1 | 16,1 |
| <i>U (mV)</i> | 54 | 56 | 57 | 58 | 61 | 63 | 64 |
| <i>R (mΩ)</i> | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| <i>T (°C)</i> | 28 | 57 | 57 | 59 | 60 | 62 | 62 |
| <i>Момент затезања = 0,1 Nm</i> | | | | | | | |
| <i>t (min.)</i> | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| <i>I (A)</i> | 16,1 | 16,1 | 16,1 | 16,1 | 16,1 | 16,1 | 16,1 |
| <i>U (mV)</i> | 55 | 56 | 61 | 68 | 89 | 97 | 112 |
| <i>R (mΩ)</i> | 3 | 3 | 4 | 4 | 6 | 6 | 7 |
| <i>T (°C)</i> | 30 | 63 | 64 | 69 | 78 | 80 | 82 |

Табела 26. Резултати мерења на утичници (пун пресек проводника (попречни пресек $1,5 \text{ mm}^2$) и јачина струје 8 А)

| <i>Момент затезања = 1 Nm</i> | | | | | | | |
|---------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| <i>t (min.)</i> | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| <i>I (A)</i> | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 8,0 |
| <i>U (mV)</i> | 42 | 42 | 44 | 44 | 44 | 44 | 45 |
| <i>R (mΩ)</i> | 5 | 5 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| <i>T (°C)</i> | 28 | 35 | 39 | 39 | 40 | 41 | 41 |
| <i>Момент затезања = 0,2 Nm</i> | | | | | | | |
| <i>t (min.)</i> | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| <i>I (A)</i> | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 8,0 |
| <i>U (mV)</i> | 55 | 55 | 55 | 64 | 68 | 68 | 68 |
| <i>R (mΩ)</i> | 7 | 7 | 7 | 8 | 9 | 9 | 9 |
| <i>T (°C)</i> | 29 | 41 | 45 | 46 | 46 | 48 | 48 |
| <i>Момент затезања = 0,1 Nm</i> | | | | | | | |
| <i>t (min.)</i> | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| <i>I (A)</i> | 8,0 | 8,0 | 7,9 | 7,9 | 7,9 | 7,9 | 7,9 |
| <i>U (mV)</i> | 94 | 95 | 96 | 98 | 98 | 99 | 101 |
| <i>R (mΩ)</i> | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 13 | 13 |
| <i>T (°C)</i> | 30 | 46 | 47 | 47 | 47 | 48 | 49 |

Табела 27. Резултати мерења на утичници (пун пресек проводника (попречни пресек $2,5 \text{ mm}^2$) и јачина струје 16 А)

| <i>Момент затезања = 1 Nm</i> | | | | | | | |
|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| <i>t (min.)</i> | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| <i>I (A)</i> | 16,2 | 16,2 | 16,2 | 16,2 | 16,2 | 16,2 | 16,2 |
| <i>U (mV)</i> | 54 | 55 | 56 | 61 | 61 | 62 | 62 |
| <i>R (mΩ)</i> | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| <i>T (°C)</i> | 27 | 48 | 57 | 60 | 62 | 64 | 64 |
| <i>Момент затезања = 0,2 Nm</i> | | | | | | | |
| <i>t (min.)</i> | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| <i>I (A)</i> | 16,0 | 16,0 | 16,0 | 16,0 | 15,9 | 15,9 | 15,9 |
| <i>U (mV)</i> | 69 | 74 | 75 | 84 | 138 | 139 | 141 |
| <i>R (mΩ)</i> | 4 | 5 | 5 | 5 | 9 | 9 | 9 |
| <i>T (°C)</i> | 28 | 53 | 63 | 64 | 64 | 67 | 70 |
| <i>Момент затезања = 0,1 Nm</i> | | | | | | | |
| <i>t (min.)</i> | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| <i>I (A)</i> | 16,0 | 16,0 | 16,0 | 16,0 | 16,0 | 16,0 | 16,0 |
| <i>U (mV)</i> | 88 | 112 | 132 | 142 | 148 | 167 | 191 |
| <i>R (mΩ)</i> | 6 | 7 | 8 | 9 | 9 | 10 | 12 |
| <i>T (°C)</i> | 28 | 72 | 95 | 97 | 122 | 134 | 148 |

Температура контакта која је достигнута након 60 минута кретала се у опсегу $38\text{--}82 \text{ }^\circ\text{C}$ за утикаче и у опсегу $41\text{--}148 \text{ }^\circ\text{C}$ за утичнице. И за утикаче и за утичнице измерена је минимална температура контакта за проводнике мањег попречног пресека ($1,5 \text{ mm}^2$), максимални момент затезања (1 Nm – одличан контакт) и минималну јачину струје (8 А), док је максимална температура добијена за већи попречни пресек ($2,5 \text{ mm}^2$), минимални момент затезања (0,1 Nm – веома лош контакт) и максималну јачину струје (16 А). Када су сви остали параметри имали исте вредности за обе врсте проводника (лицнаст или пуног

пресека), у већини анализираних случајева на контактима са бакарним проводницима пуног пресека (тестови са утикачем) измерена је нешто већа температура него на контактима са лицнастим бакарним проводницима (тестови са утичницама). Иако се у већини случајева резултати мерења могу тумачити тако да је температура завртњем изведеног прикључка у року од сат времена била температура стационарног стања, заправо, у сваком испитивању градијент температуре је био позитиван све време (60 минута). Температура контакта је расла нешто брже код контаката са моментом затезања од 0,1 Nm, што значи да је дисипирана снага расла нешто брже у случају веома лоших контаката. То такође значи да је отпорност контакта на таквим везама расла нешто брже, што није представљало последицу малог момента затезања (јер је почетна отпорност контакта била практично једнака за све примењене моменте затезања завртња на контакту), већ последицу бржег нарастања слоја оксида на контактної површини.

Треба нагласити да *PVC* изолација бакарних проводника, обично примењена у нисконапонским електричним инсталацијама, има следеће топлотне особине: њена деградација (губитак изолационих особина) почиње на 70 °C [111], њена пластична деформација на 92 °C [112], њена декомпозиција на 140 °C и њено топљење на 160 °C [113]. Сви бакарни проводници који су коришћени у описаним испитивањима имали су *PVC* изолацију. У референци [114] је наведено да долази до значајног губитка пластификатора када је *PVC* изолација изложена температури у опсегу 71–77 °C непрекидно месец дана. Такође, у референци [115] је наведено да пораст температуре утиче на електричне и механичке особине *PVC* изолације, што за резултат има смањење њене електричне отпорности и повећање фактора диелектричних губитака и диелектричне константе. Пошто су вредности температуре контакта након 60 минута биле у распону од 38 °C до 70 °C за одличне контакте (примењени моменат затезања: 1 Nm), потенцијално штетна температура за *PVC* изолацију (70 °C) није прекорачена ни у једном од разматраних случајева. Чак и за лоше контакте (примењени момент затезања: 0,2 Nm) вредности температуре контакта (такође достигнуте након 60 минута) кретале су се од 39 °C до 72 °C (у само једном од дванаест случајева температура је била нешто изнад 70 °C). Треба напоменути да је у свим случајевима са лошим контактом (0,2 Nm) температура била само мало већа од оне која се односи на

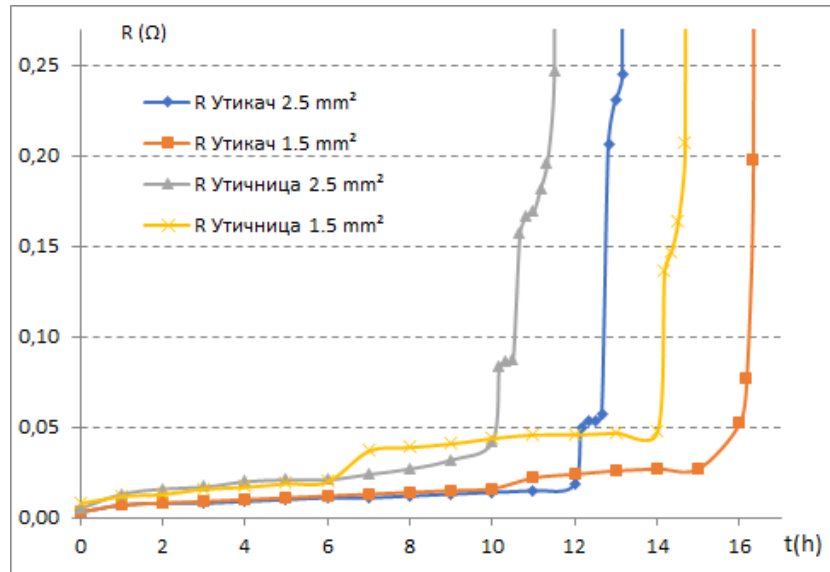
одговарајући случај са врло добрим контактом (1 Nm). Међутим, за врло лоше контакте (0,1 Nm) у пет од дванаест случајева контактна температура на утикачу и утичници знатно је премашила 70 °C са јачинама струје од 13 А и 16 А (77°C, 78 °C, 82 °C, 93 °C и 148 °C). Због тога, а у циљу посматрања даљих процеса који се односе на пораст температуре контаката, као и на повећање отпорности контаката, одлучено је да се понове неки експерименти са моментом затезања од 0,1 Nm и јачином струје од 16 А, али без ограничавања трајања експеримента.

Урађени су следећи експерименти:

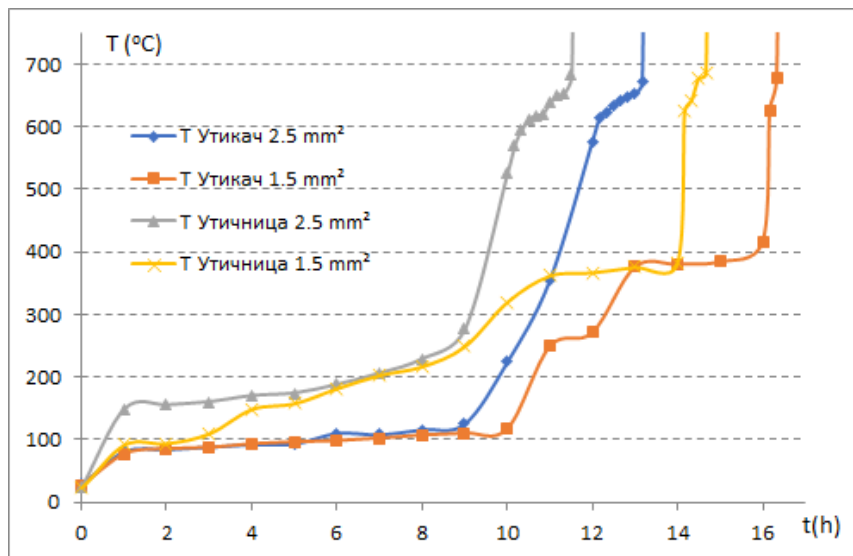
- експерименти са новим утикачем за критичне случајеве из прве серије експеримената: максимална струја од 16 А, највећа редуција момента затезања завртња (0,1 Nm) и пресеци лицнастог проводника од 2,5 mm² и 1,5 mm² (први је трајао 13h 13 min., а други 16 h 22 min.), и
- експерименти са новом утичницом за критичне случајеве из прве серије експеримената: максимална струја од 16 А, највећа редуција момента затезања завртња (0,1 Nm) и проводници пуног пресека од 2,5 mm² и 1,5 mm² (први је трајао 11h 32 min., а други 14h 43 min.).

3.2.2 Друга серија експеримената

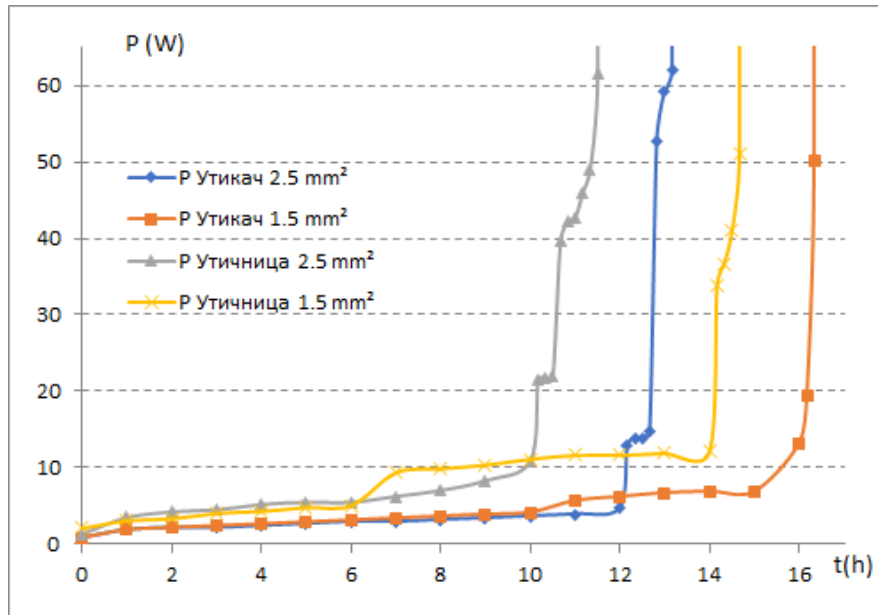
Комплетни резултати мерења у другој серији експеримената (представљени у 4 табеле) приказани су у Прилогу 3 (део Б). На сликама 44–46 представљени су графици зависности отпорности контакта испитане утичнице и утикача, њихове температуре и дисипиране снаге у функцији времена за критичан случај (јачина струје 16 А, момент затезања 0.1 Nm).



Слика 44. Графици зависности отпорности контакта у функцији времена, који важе за испитане утичнице и утикаче, са моментом затезања од $0,1 \text{ Nm}$ (врло лош контакт) и јачином струје од 16 A



Слика 45. Графици зависности температуре контакта у функцији времена, који важе за испитане утичнице и утикаче, са моментом затезања од $0,1 \text{ Nm}$ (врло лош контакт) и јачином струје од 16 A



Слика 46. Графици зависности дисипиране снаге у функцији времена, који важе за испитане утичнице и утикаче, са моментом затезања од 0,1 Nm (врло лош контакт) и јачином струје од 16 А

Резултати додатних мерења у сва четири наведена примера са моментом затезања од 0,1 Nm и јачином струје од 16 А показују да температура завртњем изведеног прикључка никада није достигла стационарно стање, као и да је градијент температуре био позитиван све време и са неколико наглих и оштрих повећања. Градијенти отпорности контакта и дисипиране снаге на контакту показали су понашање слично ономе које се односило на температурни градијент. У сва четири спроведена експеримента примећене су четири готово истоветне фазе деградације лошег контакта.

После првог сата прве фазе, дисипирана снага на контактима била је у распону 1,81–3,45 W. У наредних неколико сати, не само снага, већ и отпорност контакта и његова температура, имале су стабилан и спор раст. Ова фаза деградације лоших контаката, која је трајала шест-седам сати за утичнице и девет-десет сати за утикаче, лако се могла погрешно протумачити као стабилно и стационарно стање. У тој фази, отпорности контакта су приближно припадале опсегу 10–20 mΩ, а температуре контакта су биле приближно у распону од 100 °C до 200 °C у свим случајевима.

Друга фаза, која се може видети из дијаграма приказаних на сликама 44–46, обухватила је више или мање изненадни пораст дисипиране снаге на контактима

(до 22 W), након чега је уследио значајан пораст отпорности контакта и његове температуре (редом до 80 mΩ и 400 °C) у свим случајевима.

Трајање ове фазе је непредвидљиво, она траје од неколико десетина минута до неколико сати. Лоши контакти који дођу у ову фазу дефинитивно представљају претњу за безбедност, а уколико се открију (нпр. термовизијским прегледом), одговарајуће електроинсталационе компоненте треба заменити новим што је пре могуће.

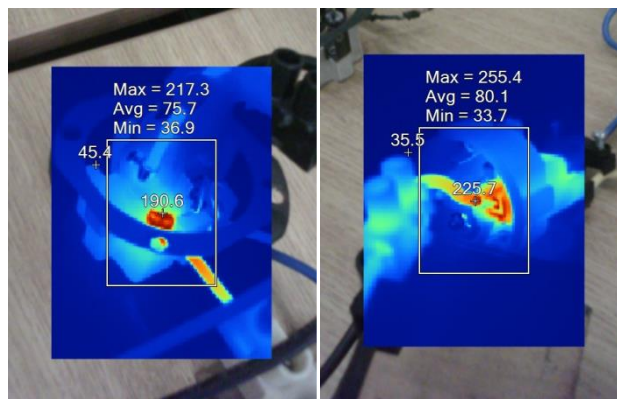
Трећа фаза је обухватила коначни и изненадни пораст дисипиране снаге (до 65 W). Трајање ове фазе је такође непредвидљиво, али је видљиво да она траје знатно краће од друге фазе (од неколико минута до неколико десетина минута). Посебну пажњу треба посветити крају ове фазе, када се дисипирана снага креће од 50 W до 65 W, отпорност контакта од 200 mΩ до 250 mΩ, док је његова температура око 700 °C. Још једном треба напоменути да је измерена температура била температура главе никлованог завртња контакта (стварна температура контакта је сигурно била већа). У референци [70] је наглашено да је температура врелог дела усијаног влакна око 1250 °C, што значи да су растопљени мостови од контактних материјала вероватно већ били формирани (месинг се топи на 930 °C [74], бакар на 1083 °C, CuO и Cu₂O на 1325 °C, челик на 1400–1535 °C, а оксиди гвожђа на 1360–1500 °C [83]). Када су ови услови постигнути, редни електрични лук, који представља четврту и завршну фазу деградације лошег контакта, успостављен је након само два-три минута у сва четири случаја.

Вредности дисипиране снаге, отпорности контакта и температуре контакта, мерене у кратком временском периоду у коме је било успостављено стално горење електричног лука, нису дате на сликама 44–46, јер су практично за ред величине веће од одговарајућих вредности добијених у трећој фази. У сва четири случаја, када се појавио редни електрични лук, дисипирана снага је изненада порасла на 400–600 W, након чега је дошло до знатног повећања отпорности контакта (до вредности у распону 1,5–2,5 Ω), док је температура контакта достигла вредности веће од 900 °C (максимална температура која је могла да се измери ласерским термометром). Стварна температура је вероватно била много већа, јер су вредности температуре редног лука које се јављају између електричних контаката у прекидачима приближно између 6000 K и 20.000 K [87].

Ове вредности одговарају температурама кључања материјала од којих је сачињен електрични контакт. У сва четири случаја електрични лук је стабилно горео неколико десетина секунди до неколико минута, након чега је трајно прекинут због раскидања растопљених мостова кључалог материјала, прекидајући струјно коло.

Треба напоменути да је у свим изведеним експериментима тело утикача и утичнице било без пластичног кућишта, што је омогућавало мерење температуре контактеног завртња помоћу термовизијске камере (примери снимака су дати на слици 47) или ласерског термометра. Ова чињеница је утицала на динамику грејања лошег контакта, тако да је трајање процеса деградације контакта трајало дуже. У стварним ситуацијама, температура лошег контакта би вероватно имала бржи раст због лошијих услова одвођења топлоте струјањем.

Слично понашање лоших контаката, са појавом врелих тачака и електричног лука, такође је забележено у поглављу 2, када су симулирани лоши контакти са бакарним и месинганим електродама (струја је, такође, износила 16 А, а попречни пресек електрода 2,5 mm²). У тим случајевима, помоћу специјалне апаратуре је била смањена ефективна површина контакта (случајеви непотпуног преклапања – површине преклапања 15% и 50%). Разлика између тих испитивања и ових са редукованим моментом затезања састоји се у томе да се у првом случају електрични лук појавио много брже – у 5. и 13. минути од почетка експеримента када је преклапање редом износило 15% и 50%. На почетку тих експеримената отпорност контакта је редом била 8 mΩ и 5 mΩ, а непосредно пре прекида електричног лука 6,25 Ω и 2,99 Ω.



Слика 47. Примери термовизијских слика „врелих“ тачака у утичници (лево) и утикачу (десно)

Може се закључити да је, без обзира на узрок деградације лошег контакта (смањена ефективна површина контакта или смањени момент затезања са завртњем изведеним прикључком), коначни исход био исти: константан раст отпорности контакта (због повећања површинског слоја оксида на контактної површини), што је доводило до појаве „вреле тачке“, а затим и електричног лука. Озбиљна оксидација прикључног контакта утичнице (оксиди су се формирали током извршеног експеримента на утичници), а која је одговорна за повећану отпорност контакта [74], јасно се види на слици 48.



Слика 48. Оксидни слој формиран на десном, завртњем изведеном прикључку, током извршеног експеримента на утичници

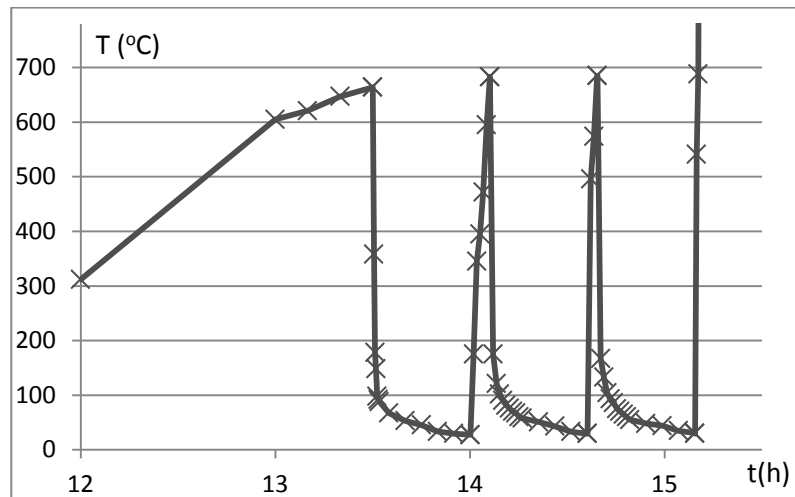
Супротно закључку из [76], експериментални резултати наведени у [74] и [88], као и они приказани у овом поглављу, показали су да намерно макроскопско покретање проводника није увек потребно за појаву усијаног споја или екстремно повишене температуре на лошем контакту. Ако је струја у струјном колу знатна и трајна, опасност од пожара у електричним инсталацијама наступа и без покретања проводника у случајевима када је момент затезања на прикључку изведеном завртњем веома мали или је ефективна површина контакта знатно смањена.

Да би се боље разумели динамика и узрок повећања отпорности контакта, одлучено је да се понови један од четири експеримента изведених у другој серији (утичница, бакарни проводник попречног пресека $2,5 \text{ mm}^2$, момент затезања $0,1 \text{ Nm}$ (врло лош контакт) и јачина струје од 16 A), али са намерним прекидањем струје непосредно пре појављивања редног електричног лука (када температура контакта практично достигне око $650 \text{ }^\circ\text{C}$), након чега следи природно хлађење

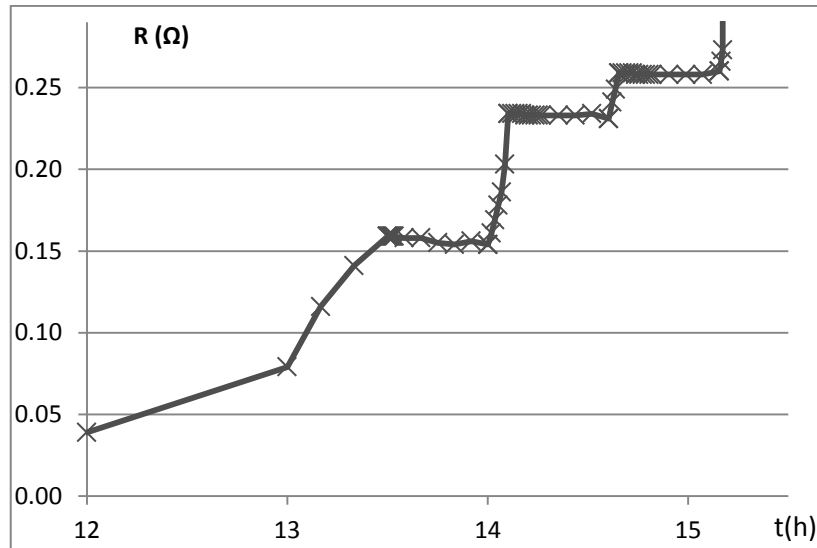
контакта у временском интервалу од 30 минута. Овај поступак се понављао све док се електрични лук не појави моментално.

3.2.3 Финални експеримент

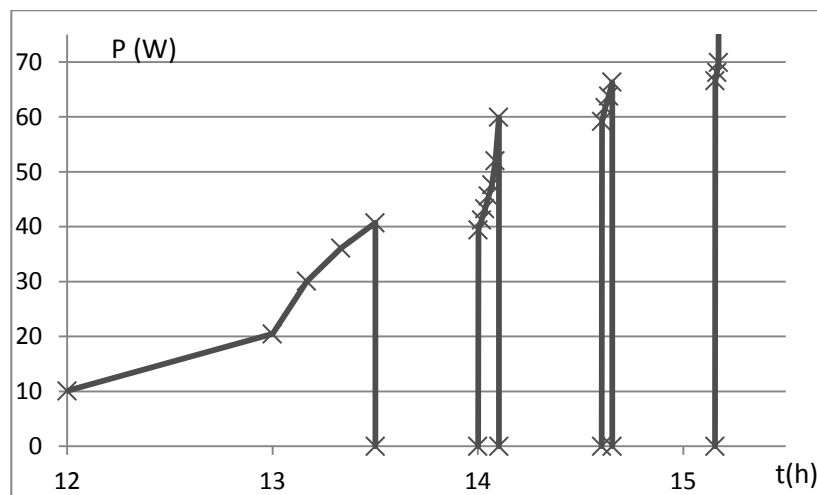
Комплетни резултати мерења извршених у овом експерименту (представљени у 4 табеле) дати су у Прилогу 3 (део Ц). У овом експерименту деградација лошег контакта прошла је кроз исте четири фазе које су карактерисале експерименте из друге серије. Услед тога, да би се фокус усмерио на вредности релевантних параметара током периода хлађења, дати су само дијаграми приказани на сликама 49–51, који представљају резултате мерења након дванаестог сата од почетка експеримента.



Слика 49. График зависности температуре контакта у функција времена (са периодима хлађења), који важи за испитивану утичницу, бакарни проводник пуног пресека са површином попречног пресека од $2,5 \text{ mm}^2$, момент затезања од $0,1 \text{ Nm}$ (врло лош контакт) и јачину струје од 16 A



Слика 50. График зависности отпорности контакта у функцији времена (са периодима хлађења), који важи за испитивану утичницу, бакарни проводник пуног пресека са површином попречног пресека од $2,5 \text{ mm}^2$, момент затезања од $0,1 \text{ Nm}$ (врло лош контакт) и јачину струје од 16 A



Слика 51. График зависности дисипиране снаге у функцији времена (са периодима хлађења), који важи за испитивану утичницу, бакарни проводник пуног пресека са површином попречног пресека од $2,5 \text{ mm}^2$, момент затезања од $0,1 \text{ Nm}$ (врло лош контакт) и јачину струје од 16 A

Финални експеримент је извршен да би се анализирао промена отпорности лошег контакта (у одређеним режимима загревања и хлађења) на прикључку шуко-утичнице при моменту затезања завртња од $0,1 \text{ Nm}$ (минималан момент који се може подесити помоћу „момент-шрафцигера“), са пуним пресеком бакарног проводника од $2,5 \text{ mm}^2$ и јачином струје од 16 A (са овим вредностима су се у претходно извршеним експериментима добијале најтоплије „вреле“ тачке). Експериментом је било предвиђено загревање лошег електричног контакта до температуре „вреле“ тачке преко $600 \text{ }^\circ\text{C}$ (као што је рађено и у претходним

експериментима), али није дозвољавана појава редног електричног лука. По достизању температуре лошег контакта преко $600\text{ }^{\circ}\text{C}$, намерно је прекидана струја електричног контакта, снимана промена температуре електричног контакта (крива хлађења контакта) и праћена промена отпорности електричног контаката. Пошто би била достигнута температура контакта приближно једнака температури амбијента, поново је успостављана струја јачине 16 A и праћена брзина промене температуре електричног контакта (крива загревања контакта), као и промена његове отпорности. Када би температура контакта поново достигла преко $600\text{ }^{\circ}\text{C}$, претходно описани поступак је понављан све до изненадне појаве редног електричног лука.

После 13 сати и 30 минута од почетка експеримента температура контакта је достигла вредност $664\text{ }^{\circ}\text{C}$, а струја је намерно прекинута како би се избегло појављивање редног електричног лука. У том тренутку дисипирана снага и контактна отпорност редом су достигле вредности од $40,7\text{ W}$ и $159\text{ m}\Omega$. Затим се контакт природно хладио 30 минута (до температуре од $28\text{ }^{\circ}\text{C}$), док је отпорност контакта остала практично иста (износила је $154\text{ m}\Omega$ на крају периода хлађења). После завршеног процеса хлађења поново је кроз контакт „пропуштена“ иста струја (16 A), а после само шест минута температура контакта је достигла $683\text{ }^{\circ}\text{C}$. Затим је струја поново намерно прекинута. У тренутку прекида струје, дисипирана снага и отпорност контакта редом су достигле вредности од $59,9\text{ W}$ и $234\text{ m}\Omega$. Поново се контакт природно хладио током 30 минута (овог пута до температуре од $30\text{ }^{\circ}\text{C}$) и поново се отпорност контакта није битно променила (на крају периода хлађења износила је $231\text{ m}\Omega$). После другог периода хлађења поново је „пропуштена“ струја од 16 A , да би након три минута процеса загревања температура контакта достигла $685\text{ }^{\circ}\text{C}$. Затим је струја поново намерно прекинута, а у том тренутку дисипирана снага и контактна отпорност достигле су редом вредности од $66,3\text{ W}$ и $259\text{ m}\Omega$. Још једном се контакт природно хладио 30 минута (овај пут до температуре од $31\text{ }^{\circ}\text{C}$), а отпорност контакта је поново остала практично иста ($260\text{ m}\Omega$). Струја од 16 A је „пропуштена“ последњи пут, да би након 60 секунди температура контакта достигла $688\text{ }^{\circ}\text{C}$ (дисипирана снага и отпорност контакта редом су износиле $69,9\text{ W}$ и $273\text{ m}\Omega$). Само 15 секунди касније (у $75.$ секунди након успостављања струје) почео је да гори редни

електрични лук. Дисипирана снага је нагло порасла на 453 W, након чега је контактна отпорност порасла на 1,79 Ω , а температура на преко 900 °C. Електрични лук је стабилно горео, изазивајући дим и топљење PVC изолације проводника, због чега је експеримент намерно прекинут после неколико секунди.

Добијени резултати су потврдили закључак до кога се дошло и након спровођења друге серије експеримената: деградација лошег контакта узрокованог смањеним моментом затезања на прикључку изведеном завртњем, услед раста површинског слоја оксида формираних на контактаној површини, прогресивно је праћена константним повећањем отпорности контакта. Још један закључак је да је током хлађења температура контакта мало утицала на отпорност лошег контакта (током целог периода хлађења, отпорност контакта се није значајно мењала). Са сваким новим успостављањем струје отпорност контакта је наставила да расте (као у случајевима без хлађења), а температуре контакта изнад 650 °C постајале су све веће и достигане су све брже (за шест минута након првог периода хлађења, за три минута након другог, а за само један минут након трећег периода, уз појаву редног електричног лука само 15 секунди касније).

3.3 Закључци

Циљ овог истраживања је био да се експериментално испитају топлотни ефекти лоших електричних контаката узрокованих смањеним моментом затезања завртњем изведених прикључака у утикачима и утичницама. Анализирани су бакарни лицнасти прводници који се користе у утикачима и бакарни проводници пуног пресека помоћу којих се утичнице повезују у струјно коло (пресека 1,5 mm² и 2,5 mm²). Испитана су три различита момента затезања подешена на завртњем изведеним прикључцима (1 Nm (одличан контакт), 0,2 Nm (лош контакт) и 0,1 Nm (врло лош контакт)). Тестиране су струје три различите јачине којима су била оптерећена одговарајућа струјна кола (8 А, 13 А и 16 А). Резултати извршених експеримената, чије је трајање такође варијало, омогућили су детаљну анализу утицаја свих напред наведених параметара на отпорност контакта и његову температуру.

Изведене су две серије експеримената и финални експеримент. У првој серији експеримената (сваки је трајао 60 минута) примећено је да је, при истим

вредностима осталих релевантних параметара, у већини анализираних случајева добијена нешто већа температура на испитаним контактима са бакарним проводницима пуног пресека (завртњем изведени прикључци (тип М4 према [87]), него на онима са лицнастим бакарним проводницима (завртњем изведени прикључци (тип М3 према [87])). Према стандарду [100], приликом инсталације бакарног лицнастог проводника на утикачу, прво се све лице проводника исправљају и затим увијају у једном правцу док не добију чврст облик сличан ономе као код проводника пуног пресека. Могуће је да прикључак изведен стезањем завртњем (на утикачу) у комбинацији са лицнастим проводником ствара електрични контакт са већом ефективном површином у поређењу са оним који постоји код завртњем изведеног прикључка проводника пуног пресека на утичници (лицнасти проводник је такође и флексибилнији од проводника пуног пресека у смислу његовог прилагођења прикључном елементу када њихова међусобна веза ослаби). Такође, прикључци изведени завртњем на ове две компоненте били су различитог типа. За врло лоше контакте (0,1 Nm) вредности температуре контакта су прелазиле 70 °C (узрокујући штетне ефекте на PVC изолацији) у пет од дванаест случајева, што показује да смањени момент затезања има значајан утицај на загревање електричних контаката у утикачима и утичницама.

Супротно закључку из [76], експериментални резултати дати у [74] и [88], као и они приказани у овом поглављу, показали су да намерно макроскопско померање проводника није увек потребно за појаву усијаног споја или знатно повишене температуре на лошим контактима. Ако су у струјном колу успостављене веће јачине струја и ако оне довољно дуго трају, а редукован је момент затезања прикључка (на утикачу или утичници), или је знатно смањена ефективна контактна површина (поглавље 2), може се појавити опасност од пожара у нисконапонским електричним инсталацијама и без макроскопског померања проводника. Наравно, микроскопски покрети жица на месту електричног контакта, углавном изазвани грејањем и хлађењем, сигурно постоје и доприносе настанку лошег контакта који одликују висока отпорност и „врела“ тачка.

Резултати добијени у другој серији експеримената и у финалном експерименту показали су да је деградација лошег контакта услед смањеног момента затезања на завртњем изведеном прикључку повећана услед раста површинског слоја оксида формираних на контактної површини, а праћена је сталним повећањем отпорности контакта. Још један закључак финалног експеримента био је да температура контакта практично није утицала на отпорност лошег контакта након што је струја намерно прекинута (током целог периода хлађења, отпорност контакта се практично није мењала). Треба имати на уму да ово посматрање важи само за један период хлађења у трајању од 30 минута, док ће временом повећана температура контакта (или повишена температура околине) сигурно утицати на процес оксидације, доприносећи повећању отпорности контакта, чак и ако нема струје која протиче кроз контакт. Са сваким новим успостављањем струје, отпорност контакта је наставила да расте и врло брзо је достигана веома висока температура контакта.

Резултати приказани у овом поглављу показују да отпорност лошег контакта већа од 80 mΩ представља претњу по безбедност. Закључено је да се замена електроинсталационих компоненти мора обавити пре него што отпорност контакта на њиховом прикључку достигне 250 mΩ. Треба узети у обзир да су ове вредности добијене у оквиру ограниченог броја испитивања спроведених у овом истраживању, због чега се могу значајно разликовати у зависности од околности. Такође, пошто су експерименти изведени коришћењем једног сета утикача и утичница (и утикачи и утичнице коришћени у овим експериментима били су типа *F* (редом *CEE 7/4* и *CEE 7/3*) [110]), као и под одређеним експерименталним условима, ове закључке не треба уопштавати за другу опрему (компоненте) или услове. Важан закључак је да не постоји могућност за детекцију лошег контакта у струјном колу мерењем отпорности петље квара и кратког споја током почетне (иницијалне) верификације нових нисконапонских електричних инсталација. Разлог томе је чињеница да деградација лошег контакта на новој електричној инсталацији (која може да изазове „врелу“ тачку) постоји и када је његова отпорност само 80 mΩ, а овако мале промене отпорности у струјном колу тешко се могу детектовати.

Истраживање представљено у следећем поглављу било је посвећено истраживању могућности детекције лошег електричног контакта на основу отпорности петље квара и/или кратког споја измерених приликом вршења периодичних верификација квалитета старих (коришћених) нисконапонских електричних инсталација, које су критичније са аспекта изазивања пожара. У циљу одређивања опсега вредности максималне отпорности лошег контакта у коришћеним (старим или корозијом оштећеним) нисконапонским електричним инсталацијама, урађен је низ експеримената на утичницама које су већ коришћене више година (30 година у конкретном анализираном случају), као и низ експеримената на новим утичницама, али са електричним контактима намерно изложеним корозији.

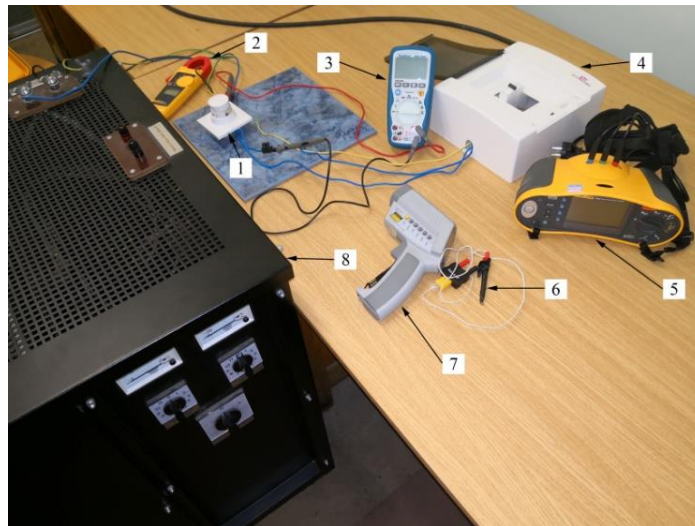
4 РАЗВОЈ МЕТОДЕ ЗА ДЕТЕКЦИЈУ СТРУЈНИХ КОЛА У КОЈИМА ПОСТОЈЕ ЛОШИ ЕЛЕКТРИЧНИ КОНТАКТИ

Применом тренутно важећих стандарда и правилника [27,28] којима је уређена област верификације квалитета нисконапонских електричних инсталација, могу да се детектују нека неисправна струјна кола. У коначном дефинисању методе за откривање лоших електричних контаката анализирани су наведени недостаци постојећих процедура, при чему су коришћени подаци добијени верификацијом квалитета нисконапонских електричних инсталација на терену и резултати мерења добијени експерименталним путем у лабораторији.

4.1 Експериментална поставка

Да би се анализирали ефекти редукције момента затезања на прикључцима проводника изведеним завртњем на њихово загревање и електричну отпорност у случајевима у којима је електроинсталациона компонента неко време била коришћена у реалној електричној инсталацији и изложена потенцијално штетним утицајима околине, експериментално су испитане једна стара (коришћена) шуко-утичница и две нове шуко-утичнице, али са намерно кородираним спојевима. Да би се убрзао процес корозије, у једној од нових утичница прикључак фазног проводника је третиран царском водом (концентрована HNO_3 : концентрована HCl = 1:3 (v / v)), а у другој новој утичници прикључак неутралног проводника третиран је концентрованом сумпорном киселином H_2SO_4 . Коришћењем ових хемикалија симулиран је ефекат дуготрајног излагања електричних контаката електроинсталационих компоненти киселој атмосфери. После третирања по једног контакта на обе утичнице количинама од 0,2 ml напред наведених хемикалија, утичнице су стављене у орман под нормалним атмосферским условима (собна температура и релативна влажност ваздуха у опсегу 50–60%), где су остале месец дана, након чега су започета експериментална испитивања на њима. Све активности око припреме хемикалија и третирања прикључних контаката утичница спроведене су у лабораторији Центра изузетних вредности за хемију и инжењеринг животне средине Института за хемију, технологију и металургију у Београду.

У лабораторијским условима је формирано испитно електрично коло са проводником дужине 3 m, попречног пресека $2,5 \text{ mm}^2$ ($PP-Y \text{ } 3 \times 2,5 \text{ mm}^2$), аутоматским прекидачем типа *B* називне струје 16 A, инсталираним у пластичној разводној табли, и једном од три испитиване утичнице (једном старом, једном новом третираном царском водом или једном новом третираном концентрованом сумпорном киселином). Разводна табла је била повезана на зидну утичницу у лабораторији, називног напона 230 V и фреквенције 50 Hz. Струја оптерећења је регулисана коришћењем декадне отпорничке кутије 230 V, 60 A. Поставка експеримента је приказана на слици 52.



Слика 52. Експериментална поставка (1 – испитивана утичница, 2 – струјна клешта *Fluke 323*, 3 – дигитални мултиметар *PeakTech 3360*, 4 – пластична разводна табла, 5 – инструмент за испитивање инсталација *Fluke 1653B*, 6 – термопар сонда типа К (хромел/алумел), 7 – инфрацрвени термометар *Cole-Parmer*, и 8 – декадна отпорничка кутија 230 V, 60 A)

На почетку сваког експеримента момент затезања прикључака изведених завртњем у испитиваној утичници подешен је на 1 Nm (одличан контакт) помоћу механичког „момент-шрафцигера“ (*Viha TorqueVario-S26462*). Затим су измерене отпорност петље квара (R_{SL-PE}) и отпорност кратког споја (R_{SL-N}) помоћу конвенционалног инструмента за испитивање нисконапонских електричних инсталација (*Fluke 1653B*). После тога, коришћењем дигиталног „момент-шрафцигера“ (*TSD-50*), момент затезања једног прикључка изведеног завртњем у утичници редукован је на 0,1 Nm (врло лош контакт). У старој утичници, прикључак на коме је извршена редукација момента затезања повезан је на фазни проводник. У једној од нових утичница прикључни контакт (третиран царском

водом) повезан је такође са фазним проводником, а у другој новој утичници прикључни контакт (третиран концентрованом сумпорном киселином) повезан је са неутралним проводником. Помоћу инструмента *Fluke 1653B*, поново су измерени R_{SL-PE} и R_{SL-N} .

Након ових почетних мерења, у струјном колу је успостављена струја јачине 16 А. Сва три лоша контакта су достигла високу температуру (750–900 °С) у интервалу 11–15 сати (15 сати за стару утичницу, 12 сати за нову третирану царском водом и 11 сати за нову која је третирана концентрованом сумпорном киселином). У сваком од та три случаја, струја је намерно прекинута пре појављивања редног електричног лука, после чега је уследило природно хлађење контакта у периоду од око 30 минута. На крају тог периода, температура контакта је достигла температуру приближно једнаку температури околине. Затим су поново измерене вредности отпорности R_{SL-PE} и R_{SL-N} . За сваку од испитаних утичница, експеримент је настављен следећег дана (након паузе од око 12 сати, током које је контакт био на температури околине). Поново су измерене отпорности R_{SL-PE} и R_{SL-N} и утврђено је да су у сва три случаја остале практично исте (ниједна контактна отпорност није промењена током паузе од 12 сати). После тога, поновљена је цела процедура загревања лошег контакта струјом од 13 А до високих температура (750-900 °С) и природног хлађења у периоду од око 30 минута, а потом је овај циклус понављан са струјама јачине редом 10 А, 8 А, 6 А и 4 А (у свим овим случајевима поновљена процедура је трајала много краће него што је то био случај са струјом јачина 16 А). У сваком од тих случајева, након 30 минута хлађења, температура контакта је била приближно једнака температури околине. Треба узети у обзир да је сваки од изведених експеримената са струјама јачине 8–16 А био намерно прекинут када се догодио најмање један од феномена који претходе појави редног електричног лука. То су исти феномени који су наведени у поглављу 3. У експериментима са струјама јачине 4 А и 6 А намерни прекид експеримента је извршен када је температура „вреле“ тачке достигла стационарну вредност (у опсегу 770–870 °С), без индикације да ће се редни електрични лук касније појавити у било ком од тих случајева.

Температура контаката је мерена помоћу ласерског термометра (*Cole-Parmer*). Пре експеримента, ласерски термометар је калибрисан помоћу

термопара типа К (хромел/алумел). Коефицијент емисивности на ласерском термометру био је подешен на 0,80, 0,85, 0,90 и 0,95 редом за температурне опсеге 0–350 °С, 350–550 °С, 550–800 °С и 800–900 °С.

Током сваког мерења температуре контакта, електрична отпорност контакта је мерена помоћу $U-I$ методе. Струја и напон су мерени струјним клештима (*Fluke 323*) и дигиталним мултиметром *PeakTech 3360*, респективно.

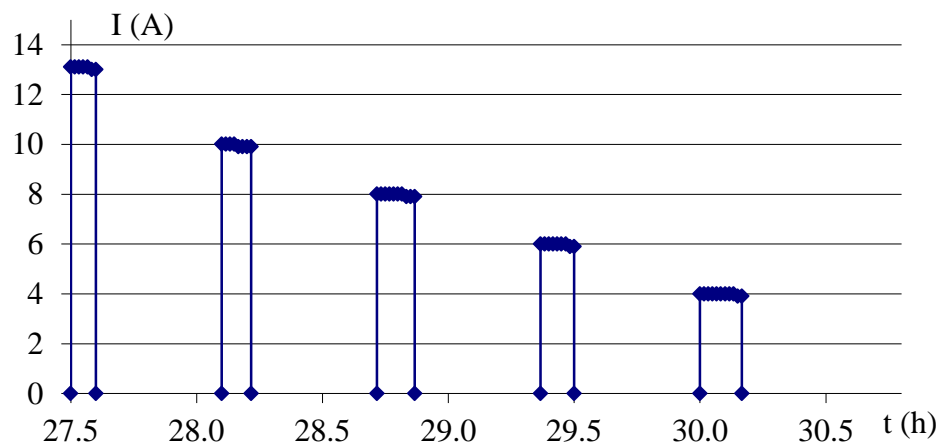
Сви параметри који описују изведене експерименте приказани су у табели 28.

Табела 28. Параметри извршених експеримената

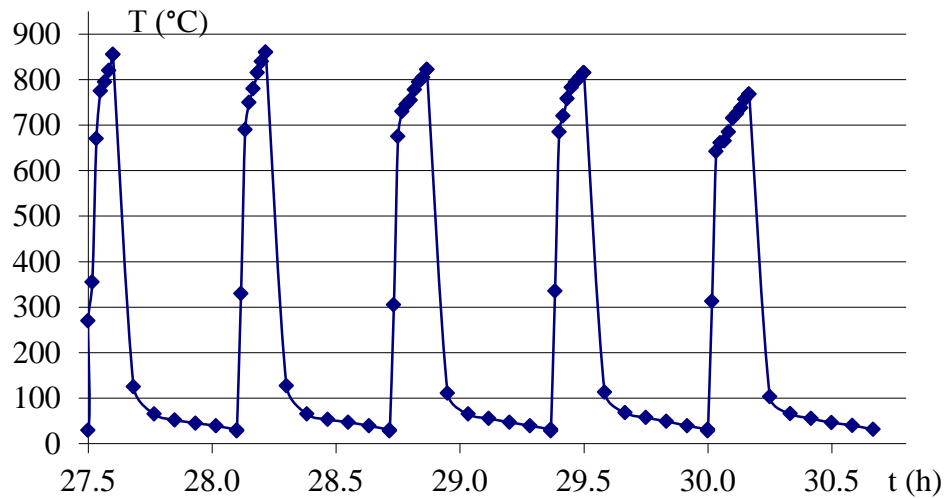
| | Иницијално испитивање | Почетно загревање | Две серије поновљених загревања са мањим струјама | |
|------------------------|-----------------------|---|---|--|
| Момент затезања | 0,1 Nm и 1 Nm | 0,1 Nm | 0,1 Nm | 0,1 Nm |
| Струја | / | 16 А до настанка феномена који претходи редном ел. луку | 13 А, 10 А и 8 А до настанка феномена који претходи редном ел. луку | 6 А и 4 А до постизања стационарне температуре „вреле“ тачке |
| Трајање | / | | | |

4.2 Резултати мерења и дискусија

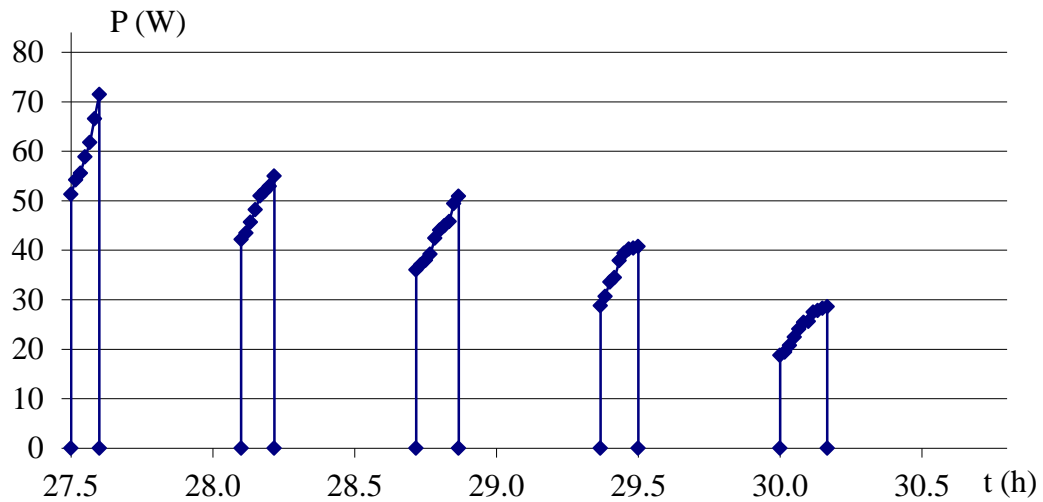
Резултати мерења који показују ефекте редукције момента затезања проводника на прикључцима изведеним завртњем на њихово загревање (и хлађење) и електричну отпорност у старој утичници, као и у новим утичницама третираним царском водом и концентрованом сумпорном киселином, представљени су помоћу 39 табела датих и Прилогу 4. Због боље прегледности и анализе, резултати мерења су представљени графички на сликама 53–64.



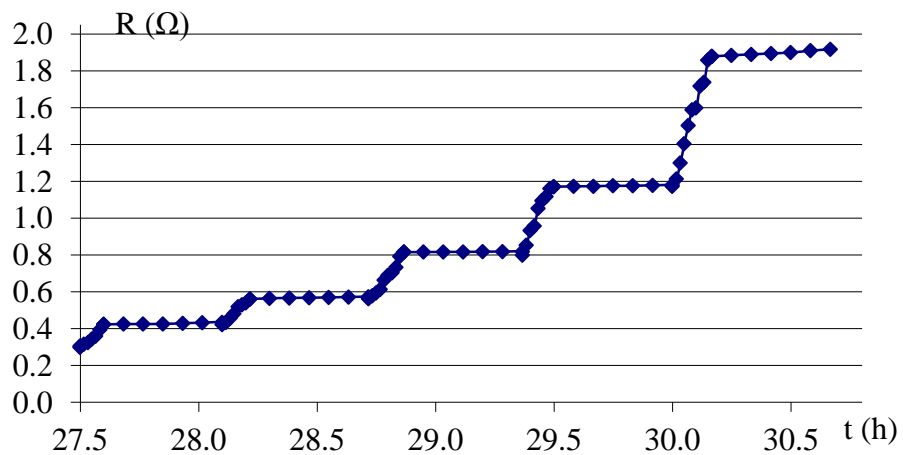
Слика 53. Промена струје контакта током огледа загревања (стара утичница)



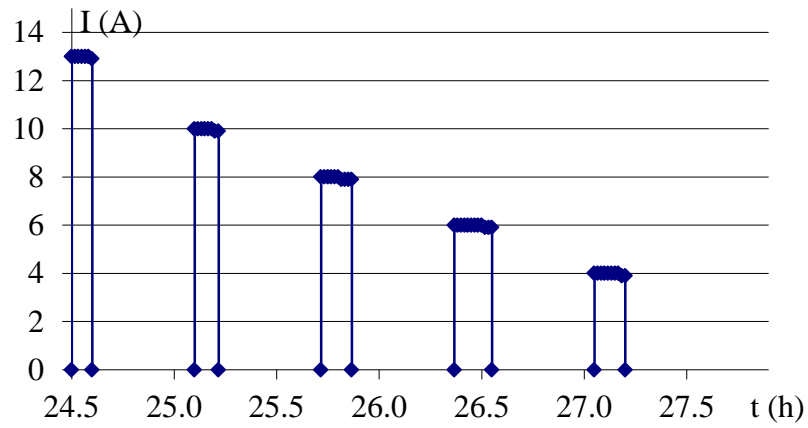
Слика 54. Промена температуре контакта током огледа загревања и хлађења (стара утичница)



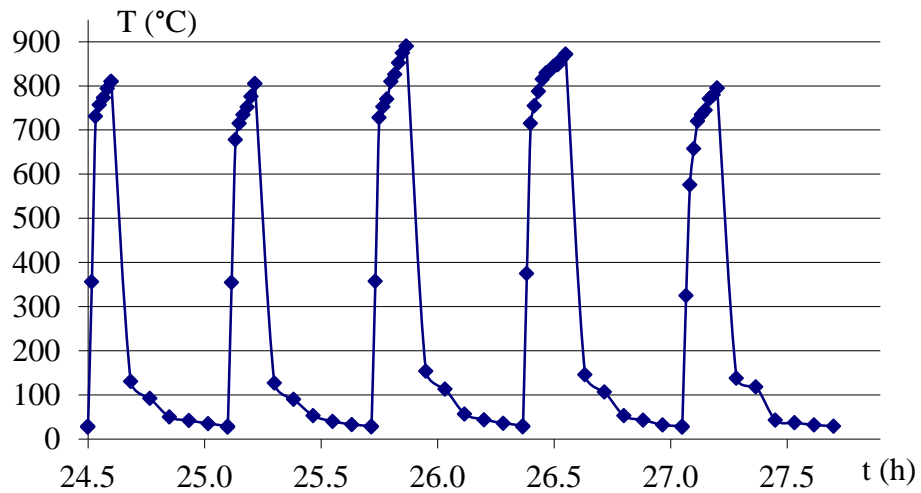
Слика 55. Дисипација снаге на контакту током огледа загревања (стара утичница)



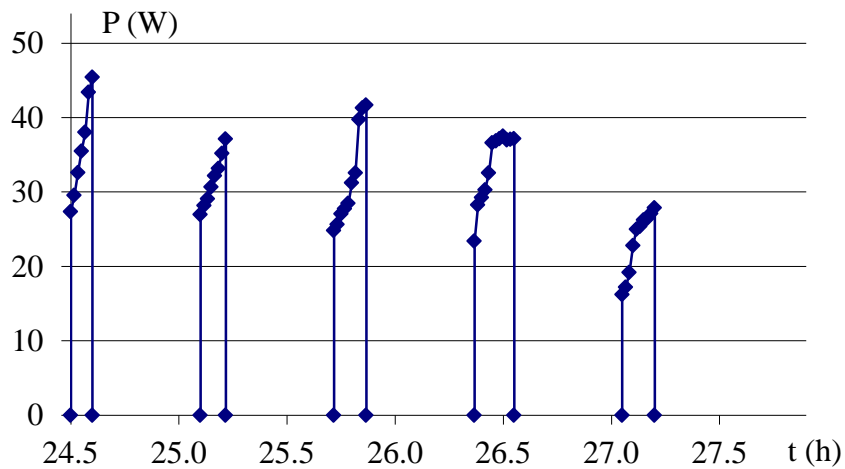
Слика 56. Промена електричне отпорности контакта током периода загревања и хлађења (стара утичница)



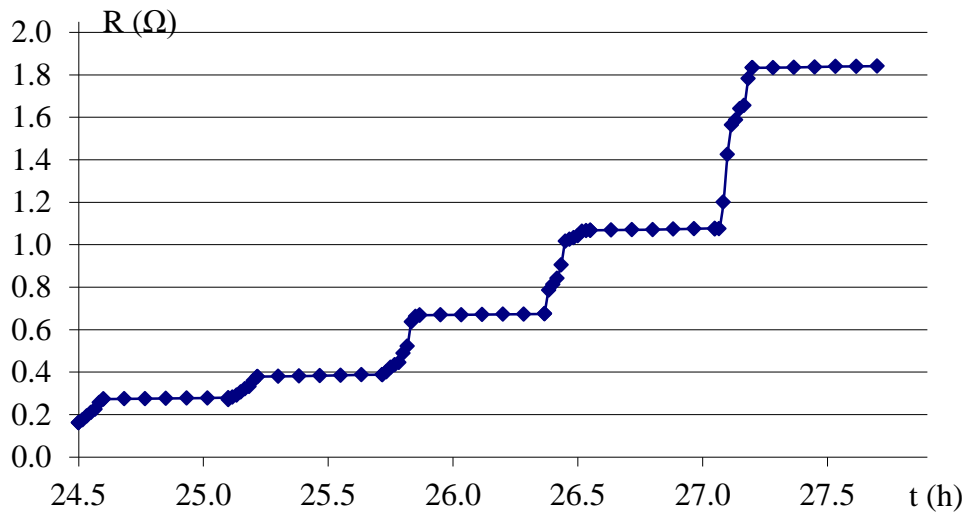
Слика 57. Промена струје контакта током огледа загревања (нова утичница третирана царском водом)



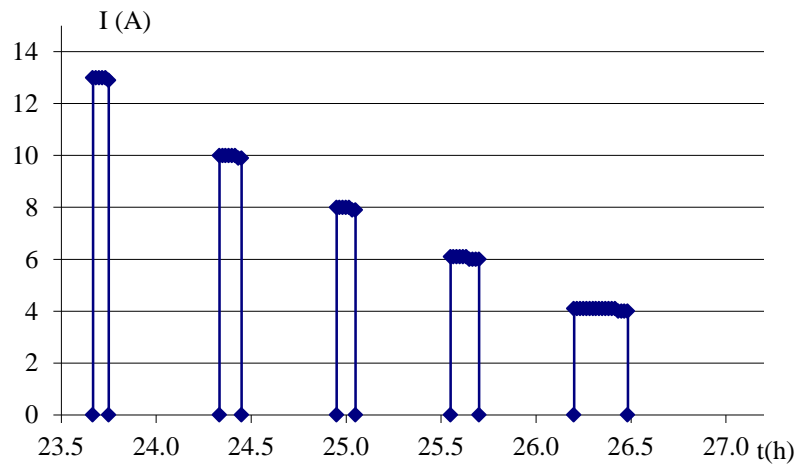
Слика 58. Промена температуре контакта током огледа загревања и хлађења (нова утичница третирана царском водом)



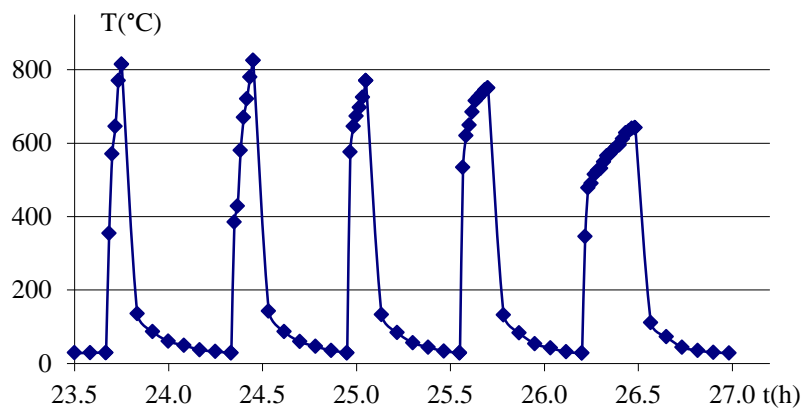
Слика 59. Дисипација снаге на контакту током огледа загревања (нова утичница третирана царском водом)



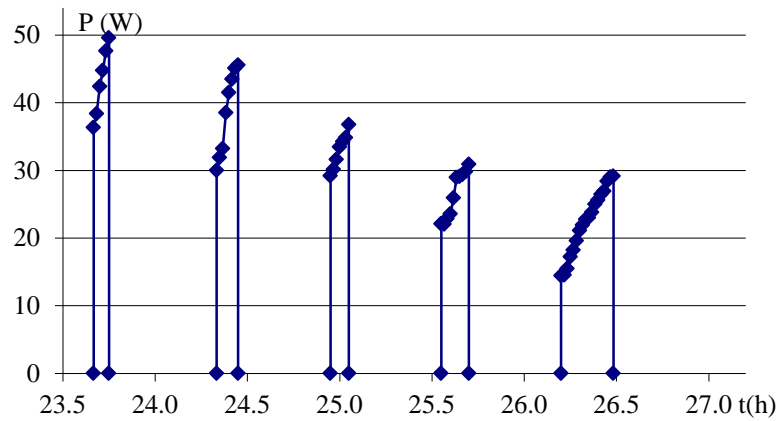
Слика 60. Промена електричне отпорности контакта током периода загревања и хлађења (нова утичница третирана царском водом)



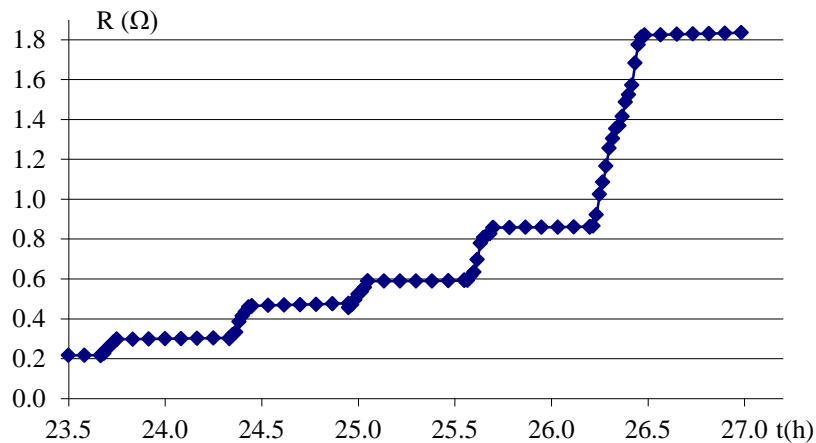
Слика 61. Промена струје контакта током огледа загревања (нова утичница третирана концентрованом сумпорном киселином)



Слика 62. Промена температуре контакта током огледа загревања и хлађења (нова утичница третирана концентрованом сумпорном киселином)



Слика 63. Дисипација снаге на контакту током огледа загревања (нова утичница третирана концентрованом сумпорном киселином)



Слика 64. Промена електричне отпорности контакта током периода загревања и хлађења (нова утичница третирана концентрованом сумпорном киселином)

У свим експериментима, дуготрајни процес достизања температуре „вреле“ тачке са називном струјом утичнице од 16 А био је сличан оном описаном у претходном поглављу. Да би се фокус усмерио на релевантне вредности параметара који описују периоде загревања и хлађења контакта, на сликама 53-64 приказани су само резултати мерења добијени током другог дана трајања сваког од извршених експеримената. Анализирајући резултате мерења приказане на сликама 53–64, примећено је да је пораст температуре лошег контакта имао слично понашање код старих и нових, али намерно кородираних, прикључака изведених завртњем. После последњег периода хлађења, тј. након последњег периода загревања (са струјом јачине 4 А), електрична отпорност лоших контаката достигла је високе вредности (1,92 Ω за стару утичницу, 1,84 Ω за нову утичницу третирану царском водом и 1,83 Ω за нову утичницу третирану

концентрираном сумпорном киселином). На основу њихових сличних вредности закључено је да се нови, али намерно кородирани прикључци изведени завртњем у утичницама могу користити за експериментално симулирање електричног понашања прикључака на старим утичницама.

За струје у опсегу 4–16 А, снага дисипирана на контактима бакарни проводник–челични никловани завртањ на прикључку утичнице припадала је опсегу 29–76 W за стару утичницу, 27–45 W за нову утичницу третирану царском водом и 30–55 W за нову утичницу третирану концентрираном сумпорном киселином. Ови резултати су у складу са онима добијеним у референци [74], где је наведено да је у оквиру спроведених експеримената измерена снага дисипације на усијаним бакарним контактима била у опсегу 17–57 W за струје у опсегу 1–15 А.

За све три утичнице су покушана и испитивања са струјом јачине 2 А (која би требало да симулира монофазна електрична оптерећења називне снаге око 500 W). Међутим, испитивање није успело ни за једну од тестираних утичница. У случају старе утичнице, на почетку испитивања са струјом од 2 А дошло је до кратког споја између контакта фазног прикључка и прикључка на који је повезан заштитни проводник. Кратак спој, који је успостављен кроз угљенисану површину керамичког кућишта утичнице, проузроковао је деловање аутоматског прекидача, који је прекинуо напајање струјног кола. Експеримент није поновљен јер се бакарни проводник прекинуо на оном прикључку старе шуко-утичнице на коме је био намерно изазван лош електрични контакт. Што се тиче нових утичница оптерећених струјом од 2 А, такође на почетку сваког испитивања, дошло је до прекида проводника на лошем контакту (фазног проводника у једном случају и неутралног проводника у другом). Ово се вероватно догодило због механичког замора и термичког оштећења материјала који је узрокован претходним дуготрајним испитивањима. Изглед оштећених тела све три утичнице, свака са проводником повезаним са лошим електричним контактом и без пластичног поклопца (кућишта), приказан је на слици 65. Може се приметити да је PVC изолација бакарног проводника у великој мери била оштећена високом температуром лошег електричног контакта у сваком од приказаних случајева.



Слика 65. Утичнице након изведених експеримената: стара (лево), нова третирана концентрованом сумпорном киселином (у средини) и нова третирана царском водом (десно)

Користећи инструмент за испитивање нисконапонских електричних инсталација, на почетку сваког експеримента, као и након сваког периода хлађења, измерене су отпорности петље квара и кратког споја, R_{SL-PE} и R_{SL-N} (за моменте затезања подешене на 1 Nm (одличан контакт) и 0,1 Nm (врло лош контакт)). Измерене вредности за све три испитиване утичнице дате су у табели 29.

Табела 29. Измерене отпорности петље квара и кратког споја, R_{SL-PE} и R_{SL-N} , пре експеримента загревања и после сваког периода хлађења

| Стара утичница | | Нова утичница (царска вода) | | Нова утичница (сумпорна киселина) | |
|--|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------------|----------------------------|
| R_{SL-PE} (Ω) | R_{SL-N} (Ω) | R_{SL-PE} (Ω) | R_{SL-N} (Ω) | R_{SL-PE} (Ω) | R_{SL-N} (Ω) |
| Момент затезања = 1 Nm, нема струје | | | | | |
| 0,46 | 0,45 | 0,44 | 0,43 | 0,47 | 0,46 |
| Момент затезања = 0,1 Nm, нема струје | | | | | |
| 0,46 | 0,45 | 0,45 | 0,44 | 0,47 | 0,46 |
| после грејања са струјом од $I \approx 16 A$ + 30 минута хлађења | | | | | |
| 0,74 | 0,73 | 0,59 | 0,58 | 0,48 | 0,66 |
| после грејања са струјом од $I \approx 13 A$ + 30 минута хлађења | | | | | |
| 0,87 | 0,86 | 0,69 | 0,68 | 0,49 | 0,75 |
| после грејања са струјом од $I \approx 10 A$ + 30 минута хлађења | | | | | |
| 1,01 | 0,98 | 0,80 | 0,78 | 0,49 | 0,92 |
| после грејања са струјом од $I \approx 8 A$ + 30 минута хлађења | | | | | |
| 1,25 | 1,23 | 1,08 | 0,95 | 0,49 | 1,04 |
| после грејања са струјом од $I \approx 6 A$ + 30 минута хлађења | | | | | |
| 1,60 | 1,59 | 1,49 | 1,46 | 0,50 | 1,30 |
| после грејања са струјом од $I \approx 4 A$ + 30 минута хлађења | | | | | |
| 2,35 | 2,32 | 2,18 | 2,05 | 0,50 | 2,26 |

Треба имати на уму да су испитивања старе и нове утичнице третиране царском водом (у оба случаја лош електрични контакт био је формиран на прикључку са фазним проводником) показала да су вредности R_{sL-PE} и R_{sL-N} измерене након сваког периода хлађења биле приближно једнаке сумама њихових иницијално измерених вредности датих у табели 29 и електричне отпорности лошег контакта чије су вредности приказане на слици 56 и 60. На пример, за стару утичницу почетна вредност R_{sL-PE} износила је 0,46 Ω (табела 29), а електрична отпорност њеног лошег контакта, измерена $U-I$ методом након загревања струјом од 4 А и периода хлађења од 30 минута, износила је 1,92 Ω (слика 56). Сума ове две вредности је 2,38 Ω и приближно је једнака вредности R_{sL-PE} измереној после загревања струјом од 4 А и периода хлађења од 30 минута, а која је износила 2,35 Ω (табела 29). Наравно, ово није био случај са отпорношћу петље квара која одговара утичници која је третирана концентрованом сумпорном киселином, а која је практично остала иста након сваког циклуса грејања и хлађења, јер је лош електрични контакт у тој утичници био формиран на прикључку са неутралним проводником (због тога се повећала само вредност отпорности кратког споја). Све почетно измерене вредности R_{sL-PE} и R_{sL-N} биле су у опсегу 0,43–0,47 Ω , чак и када је момент затезања на једном од прикључака утичнице био подешен на 0,1 Nm (врло лош контакт). Међутим, измерене вредности R_{sL-PE} , након сваког циклуса грејања и хлађења, кретале су се у опсегу 0,59–2,35 Ω за стару утичницу и једну нову која је третирана царском водом, што указује на присуство најмање једног лошег електричног контакта у њиховом струјном колу. С друге стране, измерене вредности R_{sL-N} , након сваког циклуса грејања и хлађења, за утичницу третирану концентрованом сумпорном киселином кретале су се у опсегу 0,66–2,26 Ω , што прецизно указује на то да је најмање један лош електрични контакт лоциран на неутралном проводнику (јер је отпорност петље квара R_{sL-PE} и даље задржала иницијалну ниску вредност).

4.3 Метода за детекцију лошег електричног контакта у нисконапонским електричним инсталацијама

Након завршене анализе експеримената спроведених у лабораторији (представљених у поглављу 4.2), приступљено је анализи резултата мерења

остварених на терену [50–59], са циљем дефинисања нове методе за откривање лоших електричних контаката засноване на успостављању корелације између измерених вредности отпорности петље квара и кратког споја и степена погоршања контаката, односно повећања њихове електричне отпорности. Важећи стандарди и правилници [27,28] којима је уређена област верификације нисконапонских електричних инсталација прописују да је потребно извршити проверу ефикасности система аутоматског искључења напајања у случају квара, којом могу да се детектују нека неисправна струјна кола. Иако се тим проверама у одређеним случајевима детектују лоши контакти у струјним колима, поједини лоши контакти остају неоткривени. У завршном дефинисању нове методе за откривање лоших електричних контаката анализирани су наведени недостаци постојеће процедуре, при чему су коришћени подаци добијени бројним верификацијама квалитета нисконапонских електричних инсталација на терену.

Максималне отпорности петље квара (R_{sMAX}) које обезбеђују ефикасан рад класичних заштитних компоненти (осигурача (брзих и спорих) и аутоматских прекидача (типа *B* и *C*), са називним струјама (I_r) у распону 6–25 А), одређене за *TN* систем заштите, приказане су редом у табелама 30 и 31. За сваки разматрани осигурач са топлјивим уметком, са карактеристике његовог реаговања очитана је минимална струја I_a [116] која обезбеђује његово реаговање у оквиру 0,4 s (услов из стандарда [102]). Код аутоматских прекидача, минимална струја реаговања I_a за коју аутоматски прекидачи реагују у оквиру 0,1 s (самим тим и унутар 0,4 s) износи 5 I_r и 10 I_r , редом за типове *B* и *C* [117]. У свим наведеним случајевима, вредност R_{sMAX} је добијена дељењем вредности називног фазног напона (230 V) са одговарајућом вредношћу I_a .

Табела 30. Вредности I_a и R_{sMAX} за брзе и споре уметке осигурача ($I_r = 6-25$ А)

| I_r (А) | I_a (А) | | R_{sMAX} (Ω) | |
|--------------|-----------|--------|----------------|-------|
| | брзи | спори | брзи | спори |
| 6 | 16,71 | 29,65 | 13,76 | 7,75 |
| 10 | 34,08 | 55,65 | 6,74 | 4,13 |
| 16 | 51,07 | 86,86 | 4,50 | 2,64 |
| 20 | 67,62 | 110,01 | 3,40 | 2,09 |
| 25 | 94,69 | 138,13 | 2,42 | 1,66 |

Табела 31. Вредности I_a и R_{sMAX} за аутоматске прекидаче типа B и C ($I_r = 6-25$ А)

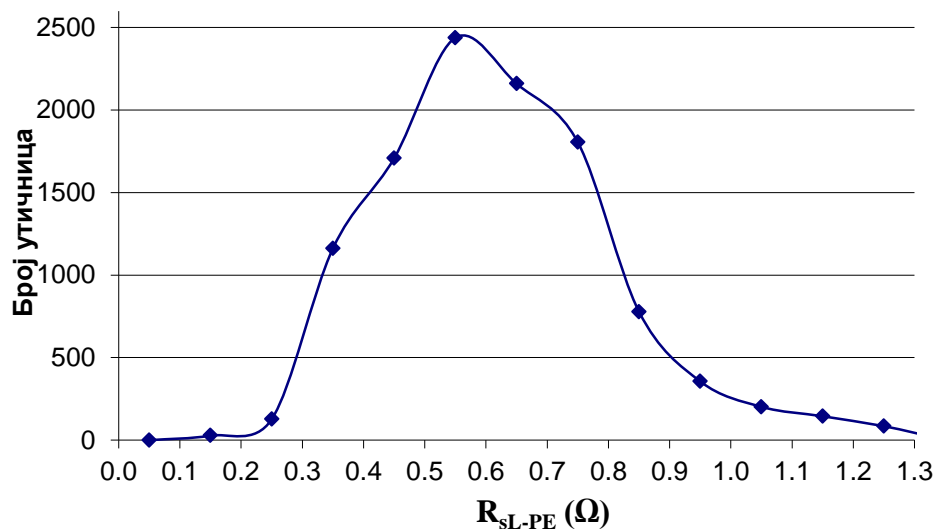
| I_r (А) | I_a (А) | | R_{sMAX} (Ω) | |
|-----------|-----------|----------|-------------------------|----------|
| | T_{un} | T_{un} | T_{un} | T_{un} |
| | B | C | B | C |
| 6 | 30 | 60 | 7,67 | 3,83 |
| 8 | 40 | 80 | 5,75 | 2,87 |
| 10 | 50 | 100 | 4,60 | 2,30 |
| 13 | 65 | 130 | 3,53 | 1,76 |
| 16 | 80 | 160 | 2,87 | 1,43 |
| 20 | 100 | 200 | 2,30 | 1,15 |
| 25 | 125 | 250 | 1,84 | 0,92 |

Из табела 30 и 31 може се видети да су вредности R_{sMAX} релативно високе, због чега правилно пројектована и изведена струјна кола у пракси најчешће испуњавају услове за ефикасно реаговање заштитног уређаја (осигурача или аутоматског прекидача) и спречавање електричног удара. Као последица тога, у многим случајевима редовна периодична верификација квалитета нисконапонских електричних инсталација може показати да је струјно коло у реду, иако у њему постоји најмање један лош електрични контакт. Ово се лако може видети анализом примера најчешћих струјних кола заштићених брзим или спорим умецима осигурача називне струје 10 А или 16 А, као и аутоматским прекидачима типа B или C истих називних струја, у којима су вредности R_{sMAX} доста високе. Оне редом износе 6,74 Ω и 4,50 Ω (за разматране брзе осигураче), 4,13 Ω и 2,64 Ω (за разматране споре осигураче), 4,60 Ω и 2,30 Ω (за разматране аутоматске прекидаче типа B), и 2,87 Ω и 1,43 Ω (за разматране аутоматске прекидаче типа C). У извршеним експериментима у лабораторијским условима (видети поглавље 4.2), на појединим утичницама отпорности петље квара (R_{SL-PE}) биле су у опсегу 0,59–2,35 Ω , а забележене су веома високе температуре „вреле“ тачке на лошем контакту. Међутим, ове вредности су мање од већине вредности R_{sMAX} које карактеришу струјна кола са заштитним уређајима називне струје 10 А или 16 А.

Слични закључци се могу извести анализом резултата периодичних верификација квалитета нисконапонских електричних инсталација које је урадила Лабораторија за испитивање нисконапонских електричних и громобранских заштитних инсталација Електротехничког факултета у јавним и пословним објектима укупне површине преко 150.000 m^2 , где је отпорност петље квара измерена за 11.243 утичнице. Прекид заштитног проводника детектован је у 84

струјна кола, због чега су корисници објеката били принуђени да изврше неопходне интервенције (место прекида заштитног проводника било је у шуко-утичницама или разводним таблама, а у појединим случајевима заштитни проводник није ни био инсталиран). Због тога је нови укупан број шуко-утичница коришћен у даљој анализи износио 11.159 (за сваку од њих била је измерена отпорност петље квара).

На слици бб приказан је број утичница за које су измерене вредности отпорности петље квара припадале опсезима 0–0,1 Ω , 0,1–0,2 Ω , ..., 1,1–1,2 Ω и 1,2–1,3 Ω . Утичнице за које је отпорност петље квара била већа од 1,3 Ω (1,5% укупног броја утичница) нису приказане на слици бб, јер су вредности њихове отпорности насумично расуте унутар широког опсега од 1,31 Ω до 7,68 Ω .



Слика бб. Број утичница за које је вредност R_{SL-PE} припадала сваком од појединачних опсега ширине 0,1 Ω

Анализом измерених отпорности петље квара, примећено је да је већина њих припадала опсегу 0,3–1 Ω . Вредности мање од 0,3 Ω биле су измерене у случајевима у којима је трансформаторска станица 10/0,4 kV била позиционирана унутар зграде или у њеној непосредној близини, као и за струјна кола на нижим етажама зграде. Вредности отпорности петље квара веће од 1 Ω биле су измерене за струјна кола на вишим етажама, јер се вредност R_{SL-PE} повећава са повећањем растојања између испитиваног струјног кола и трансформаторске станице.

На 82 утичнице измерена је отпорност R_{SL-PE} изнад одговарајућих R_{sMAX} вредности. Та струјна кола су такође проглашена неадекватним за употребу, јер услови за спречавање електричног удара аутоматским искључењем напајања нису били испуњени. У тим случајевима измерене отпорности петље квара R_{SL-PE} биле су у опсегу 1,79–7,68 Ω , што указује на постојање најмање једног лошег електричног контакта у сваком од одговарајућих струјних кола. После притезања свих електричних контаката у тим утичницама или њихове замене (када су контакти били оштећени корозијом), као и после притезања свих електричних контаката у разводним таблама и орманима (на редним клеммама, на прикључцима заштитних компоненти...), отпорност петље квара R_{SL-PE} поново је измерена и у свим случајевима је њена вредност била не само мања од R_{sMAX} , него мања и од 1,3 Ω .

Постојала су струјна кола у којима је отпорност петље квара била нижа од R_{sMAX} , али довољно велика да би указала на присуство најмање једног лошег контакта. У тим случајевима (84 утичнице), отпорности петље квара биле су у опсегу 1,3-4,38 Ω . Иако су били испуњени услови за ефикасан рад класичних заштитних компоненти за спречавање електричног удара, корисницима зграде је наложено да изврше неопходне поправке, јер су та струјна кола представљала могуће узрочнике пожара. После притезања свих електричних контаката, у свим случајевима је измерена отпорност петље квара била мања од 1,3 Ω .

Треба узети у обзир да су лоши контакти такође пронађени и у утичницама у којима су измерене отпорности биле мање од 1,3 Ω , али за најмање 0,5 Ω веће од отпорности R_{SL-PE} измерене на околним утичницама. Ово је у доброј корелацији са резултатима добијеним у експерименту спроведеном у лабораторији (видети табелу 29 у претходном поглављу). За стару утичницу, почетна вредност отпорности петље квара била је 0,46 Ω , а након формирања лошег контакта (после 15 сати његовог грејања струјом јачине 16 А) износила је 0,74 Ω . Промена отпорности R_{SL-PE} у том случају била је мања од 0,5 Ω , али треба имати у виду да у реалним случајевима постоји кумулативни ефекат нарастања слоја оксида (на пример, табела 29 показује да се због додатног грејања контакта са струјама мањих јачина отпорност R_{SL-PE} повећала са 0,74 Ω на 2,35 Ω). Такође, постоје и други контакти у струјним колима који могу довести до додатног повећања

отпорности R_{SL-PE} . Иако би било пожељно усвојити фиксну максималну вредност прихватљиве отпорности (R_{lim}) за измерене вредности R_{SL-PE} у струјним колима, није било могуће одредити њену јединствену вредност која важи за свако струјно коло, што се може илустровати следећим примером. У приземљу зграде отпорност R_{SL-PE} измерена на утичницама била је у опсегу 0,37–0,46 Ω , изузев на једној чија је отпорност R_{SL-PE} износила 0,89 Ω (ова утичница је имала лош контакт). У истој згради све измерене отпорности R_{SL-PE} за утичнице на поткровљу биле су веће од 0,89 Ω (припадале су опсегу 0,97–1,16 Ω), иако ниједна од њих није имала лош контакт. Због тога је усвојен следећи критеријум на коме почива нова метода: када се врши периодична верификација квалитета нисконапонских електричних инсталација, гранична вредност R_{SL-PE} која показује да постоји најмање један лош електрични контакт у струјном колу (R_{lim}) је она која је за 0,5 Ω већа од највеће отпорности петље квара измерене на околним утичницама.

Спроведени експерименти су такође показали да се лош контакт може појавити и само на неутралном проводнику. У таквим случајевима лош контакт се не може открити мерењем отпорности R_{SL-PE} (погледати резултате мерења приказане у табели 29 који важе за нову утичницу код које је контакт неутралног проводника третиран концентрованом сумпорном киселином). Ако је нека од измерених отпорности на утичници, R_{SL-PE} и R_{SL-N} , већа од R_{lim} , веома је вероватно да постоји најмање један лош контакт на утичници (на фазном, неутралном и/или заштитном проводнику). Такође, ако је вредност R_{SL-PE} знатно већа од R_{SL-N} , лош контакт се налази на заштитном проводнику, а ако је вредност R_{SL-N} знатно већа од R_{SL-PE} , лош контакт се налази на неутралном проводнику.

На основу претходне анализе се може закључити да не треба мерити само отпорност петље квара R_{SL-PE} , већ и отпорност петље кратког споја R_{SL-N} у сваком струјном колу (трајање сваког додатног мерења је реда пет секунди када се користи конвенционални инструмент за испитивање нисконапонских електричних инсталација). Анализом измерених вредности R_{SL-PE} и R_{SL-N} , може се утврдити да ли постоји лош контакт у струјном колу. Табела 32 садржи процедуру за откривање потенцијалних локација лоших контаката и могуће опасности од пожара у свим ситуацијама које могу настати у пракси. Наведену процедуру треба применити у случајевима у којима је измерена отпорност R_{SL-PE} мања од R_{sMAX} (у

супротном би одговарајуће струјно коло у оквиру редовне процедуре било проглашено ризичним због опасности од електричног удара).

Мерења отпорности R_{SL-PE} и R_{SL-N} , заједно са анализом заснованом на табелама 30–32, представљају нову процедуру за детекцију лоших електричних контаката у нисконапонским електричним инсталацијама, која важи за оба типа утичница (монофазне и трофазне). Разлика је у томе што се у случају трофазне утичнице мора извршити мерење R_{SL-PE} и R_{SL-N} за сваки фазни проводник, док се добијени резултати анализирају на исти начин као и за монофазне утичнице.

Табела 32. Анализа отпорности петље квара и кратког споја у случајевима у којима је измерена отпорност петље квара (R_{SL-PE}) мања од максималне дозвољене вредности отпорности петље квара (R_{sMAX}) која обезбеђује ефикасно деловање заштитне компоненте

| | | $R_{SL-PE} < R_{lim}$ | $R_{SL-PE} > R_{lim}$ | $R_{SL-PE} < R_{lim}$ | $R_{SL-PE} > R_{lim}$ |
|---|--|---|---|---|-----------------------|
| | | $R_{SL-N} < R_{lim}$ | $R_{SL-N} < R_{lim}$ | $R_{SL-N} > R_{lim}$ | $R_{SL-N} > R_{lim}$ |
| Локација лошег електричног контакта | Струјно коло вероватно нема лош електрични контакт | Лош електрични контакт на заштитном проводнику | Лош електрични контакт на неутралном проводнику | - Лош електрични контакт на фазном проводнику или - Лоши електрични контакти на два проводника (могуће су све три комбинације), или - Лоши електрични контакти на три проводника (најопаснији случај) | |
| Опасност од пожара (последиче кварова) | Вероватно не постоји | Не постоји (у случају квара заштитна компонента реагује на време) | Могућа, због „вреле“ тачке на неутралном проводнику | Могућа, због „вреле“ тачке на фазном и/или неутралном проводнику (у случају квара заштитна компонента ће одреаговати на време) | |

По завршетку периодичне верификације квалитета нисконапонских електричних инсталација која укључује примену нове процедуре, у стручном налазу је неопходно навести која струјна кола потенцијално имају лоше електричне контакте. Обавеза електричара или техничке службе корисника објекта је да пронађе и притегне све лоше електричне контакте откривене у тим струјним колима или да замени оштећене електричне компоненте. Ово се односи на класичне заштитне компоненте које се налазе у разводној табли, прекидаче и разводне кутије, а нарочито на утичнице (монофазне и трофазне). Да би се

потврдило да су кварови које су узроковали лоши електрични контакти елиминисани акцијом електричара или техничке службе, неопходно је поново измерити отпорности петље квара R_{SL-PE} и кратког споја R_{SL-N} у тим струјним колима и проверити да ли њихове новоизмерене вредности испуњавају услове за струјно коло без лошег електричног контакта и ефикасну заштиту од електричног удара у случају квара. Примена нове процедуре приликом провере стања електричних контаката знатно би смањила вероватноћу настанка опасних „врелих“ тачака. Тиме би се решио проблем немогућности откривања „врелих“ тачака помоћу термовизијског снимања у случајевима када нема директног визуелног контакта између инфрацрвеног сензора камере и електричног контакта компоненте (поред тога, термовизијско снимање обично није обавезно, већ представља препоручену технику за детекцију врелих тачака).

4.4 Примена нове методе у пракси

Предложена метода за откривање лошег електричног контакта примењена је приликом верификације квалитета нисконапонских електричних инсталација у 15 стамбених јединица различите старости (10–60 година). Резултати извршених верификација приложени су у табели датој у Прилогу 5. За верификацију квалитета нисконапонских електричних инсталација изабрани су станови у којима никада нису замењене шуко-утичнице (монофазне и трофазне). Задовољење овог услова је значило да старост зграде одговара старости електроинсталационих компоненти (шуко-утичница у анализираном случају). Мерења отпорности R_{SL-PE} и R_{SL-N} у сваком стану извршено је на десет монофазних и једној трофазној шуко-утичници. У највећем броју испитиваних струјних кола, као заштитне компоненте од струје кратког споја и преоптерећења инсталирани су аутоматски прекидачи типа *B*, максималне називне струје 16 А ($R_{sMAX} = 2,87 \Omega$) или осигурачи са брзим топлјивим уметком, такође максималне називне струје 16 А ($R_{sMAX} = 4,50 \Omega$). Да је вршена само редовна процедура провере ефикасности система аутоматског искључења напајања у случају квара, закључило би се да је у становима број 7 и 14 систем заштите од електричног удара неефикасан (измерене отпорности R_{SL-PE} биле су знатно веће од R_{sMAX}). Велике вредности R_{SL-PE} измерене су на свим

струјним колима у стану број 7, јер TN систем није био изведен, а заштитна сабирница у разводној табли била је галвански повезана на водоводну цев у купатилу (уз видљиво присуство корозије на месту споја). После изведеног TN система (кратким спајањем заштитне и неутралне сабирнице у разводној табли) проблем је решен. Велике вредности R_{SL-PE} измерене су у неколико струјних кола у стану број 14 због спојева оштећених корозијом (како на заштитним контактима шуко-утичница тако и на заштитној сабирници у разводној табли). После замене старих шуко-утичница новим, као и притезањем и чишћењем контаката на заштитној сабирници у разводној табли, новоизмерене вредности R_{SL-PE} постале су знатно мање од R_{sMAX} . Међутим, ако се примени нова метода за откривање лоших електричних контаката (која укључује мерење обе отпорности, R_{SL-PE} и R_{SL-N} , као и њихово поређење са R_{lim} која је за $0,5 \Omega$ већа од највеће отпорности петље квара (кратког споја) измерене на околним утичницама), закључује се да постоје струјна кола са лошим електричним контактом на фазном проводнику у стану број 4 (монофазна утичница број 6, на којој су обе измерене отпорности (R_{SL-PE} и R_{SL-N}) биле веће од отпорности R_{lim}), као и на неутралном проводнику у стану број 15 (монофазна утичница број 8, на којој је измерена отпорност R_{SL-N} (али не и измерена отпорност R_{SL-PE}) била већа од отпорности R_{lim}). У кухињи стана број 4 нестручно је инсталирана шуко-утичница, која се, само повремено користи (за миксер и електрични бокал). Чишћењем и притезањем олабављеног контакта на прикључку фазног проводника ове шуко-утичнице отклоњен је потенцијални узрочник пожара. У стану број 15 пронађена је шуко-утичница (инсталирана у дневној соби) која се такође повремено користи за прикључење усисивача. Заменом ове шуко-утичнице новом проблем је такође решен. У старим становима број 14 и 15 применом нове методе детектовано је повећање контактне отпорности на прикључку заштитног проводника на трофазним шуко-утичницама које се користе за напајање електричног шпорета (све измерене вредности R_{SL-PE} биле су мање од R_{sMAX} , али веће од R_{lim}). После замене старих трофазних шуко-утичница новим, поново измерене вредности R_{SL-PE} имале су уобичајене вредности измерене на околним утичницама (без лошег електричног контакта). Такође, у становима број 2 и 12 применом нове методе детектоване су повећане контактне отпорности на заштитном контакту монофазних шуко-утичница (обе измерене

вредности R_{SL-PE} биле су мање од R_{sMAX} , али знатно веће од уобичајених вредности R_{SL-PE} измерених на околним утичницама, односно веће од R_{lim}). Притезањем контаката на прикључку заштитног проводника обе шуко-утичнице проблем је решен.

4.5 Закључак

Први циљ овог истраживања био је да се експериментално утврди утицај редукције момента затезања проводника на прикључку (изведеном завртњем) у старој (коришћеној) утичници и у две нове утичнице, али са намерно кородираним прикључцима, на њихово загревање и електричну отпорност. Закључено је да се нови, али намерно кородирани, прикључци изведени завртњем на утичницама могу користити за експерименталну симулацију како пораста температуре тако и електричне отпорности дуго коришћених (старих) утичница.

Други циљ овог истраживања био је да се истражи могућност откривања лошег електричног контакта у струјним колима током вршења периодичне верификације квалитета нисконапонских електричних инсталација мерењем не само отпорности петље квара (R_{SL-PE}) већ и мерењем отпорности кратког споја (R_{SL-N}). Резултати мерења у лабораторији и на терену показали су да се отпорност за 0,5 Ω већа од највеће измерене отпорности R_{SL-PE} (R_{SL-N}) на околним утичницама може препоручити као гранична отпорност (R_{lim}) која показује да ли постоји лош контакт у одговарајућем струјном колу.

Коначни циљ овог истраживања био је израда нове методе (процедуре) за откривање лоших електричних контаката у нисконапонским електричним инсталацијама, на основу мерења отпорности R_{SL-PE} и R_{SL-N} и њиховог поређења са R_{lim} . Једноставном анализом која се заснива на табели 32, нова метода (процедура) за детекцију лоших електричних контаката у нисконапонским електричним инсталацијама, која важи за оба типа утичница (монофазне и трофазне), омогућава да се детектују лоши електрични контакти у струјном колу (на фазном, и/или неутралном и/или заштитном проводнику).

Примена нове процедуре је ограничена на TN систем заштите од електричног удара, који је најчешће примењен систем заштите. Такође, треба нагласити да се неки лоши контакти не могу открити применом нове процедуре.

На пример, веза између проводника и прикључка на некој електроинсталационој компоненти може бити лабава, али ако је тај спој чист, са веома ниском отпорношћу контакта (нова електрична инсталација), одговорно лице које врши верификацију нисконапонских електричних инсталација на основу измерених малих отпорности R_{SL-PE} и R_{SL-N} може извести погрешан закључак да је инсталација исправна иако у њој постоји олабављена веза (лош електрични контакт). Управо због тога, нова метода (процедура) не препоручује се код иницијалне (почетне) верификације квалитета нисконапонских електричних инсталација. Применом нове процедуре на старе (коришћене) електричне инсталације такође не могу да се детектују лоши електрични контакти у струјним колима неких фиксних пријемника (као што су нпр. светиљке), јер се код њих и не примењује редовна процедура мерења отпорности петље квара R_{SL-PE} (не постоји опасност од електричног удара, јер је светиљка ван домашаја руке, а у појединим струјним колима осветљења није ни изведен заштитни проводник).

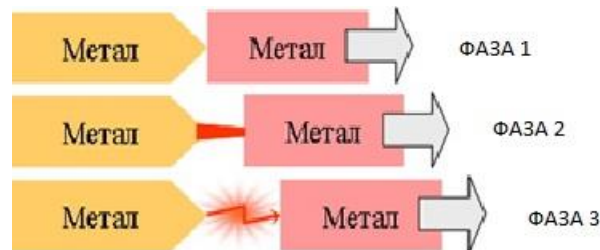
Како електрична инсталација стари, а нарочито ако је изложена повећаној влажности, хемијским агенсима и прабини, тако примена препоручене процедуре постаје ефикаснија у откривању лоших електричних контаката.

Предложена метода за откривање лошег електричног контакта успешно је примењена приликом вршења верификације квалитета нисконапонских електричних инсталација у стамбеним јединицама различите старости (10–60 година). Није уочена веза између старости стамбених јединица (тачније, старости њихових електричних инсталација) и вероватноће настанка опасне „вреле“ тачке на лошем електричном контакту у струјним колима монофазних и трофазних пријемника, јер би за њено евентуално успостављање било неопходно применити нову методу за откривање лошег електричног контакта на више хиљада утичница у становима широког опсега старости. Ово, наравно, може да представља један од важнијих праваца даљег истраживања у овој области.

5 ИСПИТИВАЊЕ ФУНКЦИОНАЛНОСТИ РАДА *AFDD* КОМПОНЕНТЕ

Лош електрични контакт у нисконапонским електричним инсталацијама представља квар који у неким ситуацијама може да изазове пожар, али већу опасност представља чињеница да лош контакт који се благовремено не отклони може прогресивно да се развије у далеко опаснији квар – редни електрични лук – који веома лако може да изазове пожар. Струја редног електричног лука не може бити већа од струје оптерећења, јер је ограничена импедансама оптерећења и електричног лука, због чега класичне заштитне компоненте не реагују на његову појаву [64]. На европском тржишту се пре неколико година појавила заштитна *AFDD* компонента, која се уграђује у разводне табле уместо аутоматског прекидача и има могућност да, између осталих кварова, праћењем таласног облика струје у колу, препозна јединствене карактеристике редног електричног лука, после чега правовремено прекида напајање струјног кола у коме се он појавио. У овом поглављу су представљени резултати експерименталног испитивања функционалности *AFDD* компоненте, спроведеног у Лабораторији за испитивање нисконапонских електричних и громобранских заштитних инсталација Електротехничког факултета у Београду. Наведена компонента разликује електрични лук настао у нормалном режиму рада неких компоненти и уређаја (прекидачи, комутаторски мотори, итд.), као и струју појединих уређаја која је по свом таласном облику слична струји електричног лука (нпр. уређаји са енергетским претварачима, компакт флуо извори, итд.), од нежељеног електричног лука насталог услед квара у нисконапонској електричној инсталацији [25]. На пример, искључење прекидача у струјном колу осветљења изазива краткотрајан електрични лук између крајева контакта прекидача. Исто тако, ако се приликом искључења утикача из утичнице уређај налазио у радном режиму, може се појавити краткотрајан електрични лук. Код колекторских мотора стално се јавља електрични лук између четкица и колектора. Овакве и сличне ситуације које се појављују у пракси треба дозволити, тј. *AFDD* компоненте тада не смеју да реагују.

На слици 67 приказано је како се редни електрични лук успоставља између две металне електроде. Пожар може да настане од директне топлоте електричног лука, од врелог гаса који испарава из електричног лука или од врелих металних куглица директно избачених из електричног лука на запаљиви материјал [25].

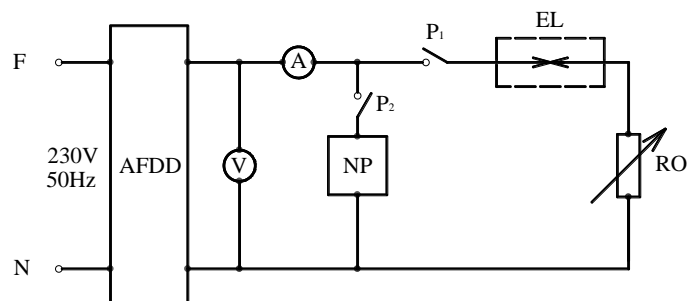


Слика 67. Успостављање редног електричног лука између две металне електроде [25]

На месту на коме се између два метална проводника појави лош електрични контакт (фаза 1) после краћег или дужег временског периода, а у зависности од јачине струје, температуре споја и материјала који формирају електрични контакт, формираће се тзв. мост, састављен од метала и металног оксида (фаза 2). „Протицање“ струје кроз повећану отпорност суженог проводног канала на месту насталог лошег контакта изазива повећање температуре до тачке топљења, када се на месту лошег електричног контакта успоставља редни електрични лук (фаза 3) [24].

5.1 Експериментална провера функционалности *AFDD* компоненте

Сви експерименти у оквиру овог истраживања извршени су помоћу апаратуре чија је шема веза приказана на слици 68.



Слика 68. Шема веза апаратуре за испитивање функционалности *AFDD* компоненте

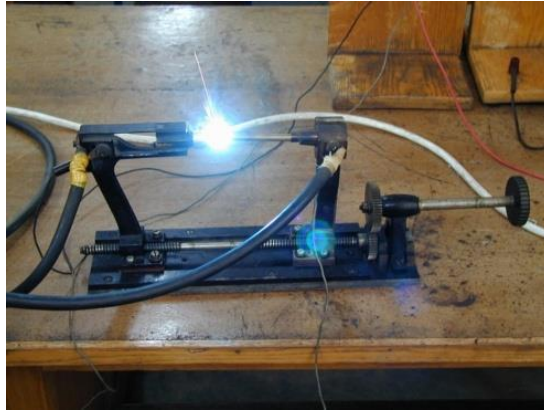
У уводном делу дисертације описан је принцип рада *AFDD* компоненте. У овом поглављу су описани експерименти помоћу којих је извршено детаљно тестирање *AFDD* компоненте (комбинација *AFD* јединице и двополног аутоматског прекидача), приказани резултати експеримената и изведени закључци. Извршени су:

1. Експерименти помоћу којих је извршена провера функционалности (реаговања) *AFDD* компоненте у случају успостављања редног електричног лука, и то за следеће комбинације материјала електрода: бакар–бакар и бакар–месинг. Помоћу регулационог термичког пријемника (отпорничке кутије) извршени су експерименти при струјама оптерећења 1–16 А (са кораком $\Delta I = 1$ А).
2. Експерименти помоћу којих је вршена провера функционалности (нераговања) *AFDD* компоненте при нормалном раду нелинеарних пријемника који садрже енергетску електронику (фрижидер, рачунар, ласерски штампач, микроталасна пећница и клима-уређај).
3. Експерименти помоћу којих је вршена провера функционалности (реаговања) *AFDD* компоненте при појави редног електричног лука у струјном колу термичког пријемника на које су прикључени и нелинеарни пријемници или пријемници који у свом саставу имају колекторске моторе (рачунар, ласерски штампач, микроталасна пећница, клима-уређај, фрижидер, усисивач, фен, бушилица итд.). Помоћу ових тестова је проверавано да ли струја наведених пријемника може да „маскира“ јединствен таласни облик струје редног електричног лука.
4. Експерименти помоћу којих је вршена провера функционалности (нераговања) *AFDD* компоненте при нормалном раду пријемника који садрже колекторски мотор (усисивач, бушилица и фен).

5.2 Резултати и дискусија

Резултати испитивања функционалности *AFDD* компоненте приказани су у табелама 33–41 [64]. Оне садрже вредности струје при којима је вршено испитивање, информацију о томе да ли је *AFDD* компонента реаговала и коментар. Редни електрични лук је намерно изазиван помоћу механичког система

за фино подешавање размака између електрода између којих се он формирао (на шеми веза приказаној на слици 68 он је означен са *EL*, а изглед апаратуре је приказан на слици 69).



Слика 69. Апаратура за формирање редног електричног лука

5.2.1 Резултати експеримената са термичким пријемницима

За симулацију термичког пријемника (шпорет, пегла, електрични радијатор, бојлер, кварцна грејалица итд.), коришћена је регулациона отпорничка кутија 230 V, 60 A (на шеми веза приказаној на слици 68 означена је са *RO*). У првом експерименту је редни електрични лук успостављен уз помоћ апаратуре у којој је једна електрода била од бакара, а друга од месинга. На овај начин је симулиран веома чест контакт у пракси између бакарног проводника и, на пример, прикључка на утичници који је најчешће израђен од месинга. Шантом на отпорничкој кутији вршено је фино подешавање струје у струјном колу чије су вредности очитаване на амперметру који је на шеми са слике 68 означен са *A*. Резултати испитивања су дати у табели 33 (у шеми веза приказаној на слици 68 прекидач *P1* је био у затвореном, а прекидач *P2* у отвореном положају).

Табела 33. Провера функционалности (реаговања) *AFDD* компоненте при појави струје редног електричног лука (1–16 A) – комбинација електрода: бакар–месинг

| Јачина струје (A) | <i>AFDD</i> реагује ДА/НЕ | Коментар |
|-------------------|------------------------------|--|
| 1–2 (корак 1 A) | НЕ | Тешко се успоставља „варничење“ на лошем контакту |
| 3–6 (корак 1 A) | ДА | Нестабилан (прекидни) редни електрични лук; <i>AFDD</i> тренутно реагује |
| 7–16 (корак 1 A) | ДА | Стабилан редни електрични лук; <i>AFDD</i> тренутно реагује |

У другом експерименту су за симулацију могућег прекида бакарног проводника и успостављање редног електричног лука на месту прекида коришћене обе електроде од бакара. Резултати испитивања су дати у табели 34 (у шеми веза приказаној на слици 68 прекидач *P1* је био у затвореном, а прекидач *P2* у отвореном положају).

Табела 34. Провера функционалности (реаговања) *AFDD* компоненте при појави струје редног електричног лука (1-16 А) – комбинација електрода: бакар–бакар

| Јачина струје (А) | <i>AFDD</i> реагује ДА/НЕ | Коментар |
|-------------------|------------------------------|--|
| 1–3 (корак 1 А) | НЕ | Не може да се успостави редни електрични лук |
| 4–9 (корак 1 А) | ДА | Нестабилан (прекидни) редни електрични лук; <i>AFDD</i> реагује после 1-2 s |
| 10–16 (корак 1 А) | ДА | Стабилан редни електрични лук; <i>AFDD</i> тренутно реагује |

5.2.2 Резултати експеримената са нелинеарним пријемницима

Нелинеарни пријемници који су коришћени у овом експерименту су: микроталасна пећ типа АНИТА, називне снаге 1300 W (радна учестаност 2450 MHz), клима-уређаји типа GALANZ, називне снаге 1300 W при хлађењу и 1380 W при грејању, фрижидер типа TELEFUNKEN (TRSCC860A), називне снаге 360 W, рачунари (са монитором) и ласерски штампачи типа HEWLETT PACKARD. Пошто микроталасна пећ има више режима рада, испитивања су вршена са 20%, 50% и 90% њене називне снаге. И клима-уређаји су имали могућност подешавања режима рада (радне струје су износиле 0,5–5,5 А). На шеми веза приказаној на слици 68 сви ови пријемници су симболички означени са *NP*.

Прво је извршена провера функционалности (нераговања) *AFDD* уређаја у струјном колу на које је била прикључена само микроталасна пећ. Ни у једном од три поменута режима рада микроталасне пећи *AFDD* компонента није реаговала. Затим су изведени експерименти са два клима-уређаја, па са фрижидером, онда са два рачунара и, на крају, са два ласерска штампача. У свим случајевима је констатовано да *AFDD* компонента није реаговала. После овога су на заједничко струјно коло биле прикључене разне комбинације нелинеарних пријемника: микроталасна пећ – два клима-уређаја, два рачунара – два ласерска штампача, два

клима-уређаја – два рачунара и микроталасна пећ – два рачунара. Резултат експеримента је био увек исти: *AFDD* компонента није реаговала. У свим овим експериментима, прекидач *P2* је био у затвореном, а прекидач *P1* у отвореном положају.

Затим су извршени експерименти у којима су на заједничко струјно коло били прикључени нелинеарни пријемници и термички пријемник (отпорничка кутија). У делу струјног кола са термичким пријемником успостављан је редни електрични лук. Његово успостављање је вршено уз помоћ апаратуре (*EL*) за критичан случај бакарне и месингане електроде. На овај начин је вршена провера функционалности (реаговања) *AFDD* компоненте, односно показано је да струје нелинеарних пријемника не „маскирају“ струју редног електричног лука. У свим овим експериментима, оба прекидача (*P1* и *P2*) била су у затвореном положају.

Резултати описаних испитивања су дати у табелама 35–38.

Табела 35. Провера функционалности (реаговања) *AFDD* уређаја (анализа једновременог рада микроталасне пећи и термичког пријемника у коме је био успостављен редни електрични лук)

| Јачина струје (А) | <i>AFDD</i> реагује ДА/НЕ | Коментар |
|-------------------|------------------------------|--|
| 5 | ДА | <i>AFDD</i> је успешно реаговао у свим испитиваним режимима рада микроталасне пећи |
| 8 | ДА | |
| 10 | ДА | |

Табела 36. Провера функционалности (реаговања) *AFDD* уређаја (анализа једновременог рада клима-уређаја и термичког пријемника у коме је био успостављен редни електрични лук)

| Јачина струје (А) | <i>AFDD</i> реагује ДА/НЕ | Коментар |
|-------------------|------------------------------|--|
| 6 | ДА | <i>AFDD</i> је успешно реаговао у свим испитиваним режимима рада клима-уређаја |
| 8 | ДА | |
| 10 | ДА | |
| 12 | ДА | |

Табела 37. Провера функционалности (реаговања) *AFDD* уређаја (анализа једновременог рада два рачунара, два штампача и термичког пријемника у коме је био успостављен редни електрични лук)

| Јачина струје (А) | <i>AFDD</i> реагује ДА/НЕ | Коментар |
|-------------------|------------------------------|---------------------------------|
| 6 | ДА | <i>AFDD</i> је успешно реаговао |
| 10 | ДА | |

Табела 38. Провера функционалности (реаговања) *AFDD* уређаја (анализа једновременог рада фрижидера и термичког пријемника у коме је био успостављен редни електрични лук)

| Јачина струје (А) | <i>AFDD</i> реагује ДА/НЕ | Коментар |
|-------------------|------------------------------|---------------------------------|
| 8 | ДА | <i>AFDD</i> је успешно реаговао |
| 13 | ДА | |

5.2.3 Резултати експеримената са пријемницима који у свом саставу имају колекторски мотор

Последњом групом експеримената извршена је провера функционалности (нераговања) *AFDD* компоненте при нормалном раду пријемника који садрже колекторски мотор. То су били следећи пријемници: усисивач типа СЛОБОДА Чачак, називне снаге 1000 W, бушилице типа ИСКРА, називне снаге 550 W и 650 W, и фен марке *EOLIC*, називне снаге 1800 W (са два степена брзине и три степена јачине грејања). На шеми веза приказаној на слици 68 сви ови пријемници су симболички означени са *NP*.

Прво је извршена провера функционалности (нераговања) *AFDD* компоненте у случајевима када су на струјно коло појединачно били прикључени сви напред наведени пријемници са колекторским мотором. *AFDD* компонента није реаговала ни у једном случају. Затим су на исто струјно коло биле прикључене комбинације пријемника са колекторским мотором: усисивач – бушилица, усисивач – фен, бушилица – фен, усисивач – две бушилице – фен. Ни у једном случају *AFDD* компонента није реаговала. У свим овим експериментима, прекидач *P2* је био у затвореном, а прекидач *P1* у отвореном положају.

На крају су извршени експерименти у којима су на исто струјно коло били прикључени пријемник са колекторским мотором и термички пријемник (отпорничка кутија) у чијем делу струјног кола се успостављао редни електрични лук. Успостављање редног електричног лука је поново вршено помоћу исте апаратуре (*EL*) за критичан случај бакарне и месингане електроде. Тиме је извршена провера функционалности (реаговања) *AFDD* компоненте, односно показано је да струје пријемника са колекторским мотором не „маскирају“ струју редног електричног лука. У свим овим експериментима, оба прекидача (*P1* и *P2*) била су у затвореном положају.

Резултати описаних испитивања су дати у табелама 39–41.

Табела 39. Провера функционалности (реаговања) *AFDD* уређаја (анализа једновременог рада усисивача и термичког пријемника у коме је био успостављен редни електрични лук)

| Јачина струје (А) | <i>AFDD</i> реагује ДА/НЕ | Коментар |
|-------------------|------------------------------|--|
| 4 | ДА | <i>AFDD</i> је успешно реаговао у свим испитиваним режимима рада усисивача |
| 7 | ДА | |
| 12 | ДА | |

Табела 40. Провера функционалности (реаговања) *AFDD* уређаја (анализа једновременог рада бушилица и термичког пријемника у коме је био успостављен редни електрични лук)

| Јачина струје (А) | <i>AFDD</i> реагује ДА/НЕ | Коментар |
|-------------------|---------------------------|---|
| 6 | ДА | <i>AFDD</i> је успешно реаговао у свим испитиваним варијантама са једном или две бушилице |
| 10 | ДА | |

Табела 41. Провера функционалности (реаговања) *AFDD* уређаја (анализа једновременог рада фена и термичког пријемника у коме је био успостављен редни електрични лук)

| Јачина струје (А) | <i>AFDD</i> реагује ДА/НЕ | Коментар |
|-------------------|---------------------------|---|
| 4 | ДА | <i>AFDD</i> је успешно реаговао у свим режимима рада фена |
| 7 | ДА | |
| 10 | ДА | |

5.3 Техно-економска анализа

Приликом разматрања могућности да се у будућности *AFDD* компонента уведе у стандардну праксу пројектовања и извођења електричних инсталација у стамбеним објектима у Србији, треба размотрити додатна финансијска улагања неопходна за уградњу овакве компоненте уместо аутоматског прекидача.

Цена *AFDD* компоненте која је присутна и на нашем тржишту износи око 100 евра. Пошто у стану просечне величине (60–70m²) број струјних кола код којих називна струја аутоматског прекидача није мања од 10 А износи десетак, додатно улагање би било око 1000 евра (мање од 2% цене стана), што се може сматрати оправданим, јер би се знатно смањила вероватноћа појаве пожара услед настанка редног електричног лука. Напоменимо да је иницијална цена *AFCI* прекидача у САД (2002. године) износила око 150 америчких долара, а да је данас њена цена око 25 долара. На основу овога се може очекивати да ће и цена *AFDD* компоненте временом брзо опасти и да њена уградња неће представљати већи трошак за инвеститора.

5.4 Закључци и препоруке

На основу експеримената помоћу којих је тестирано функционисање *AFDD* компоненте, изведених у Лабораторији за испитивање нисконапонских електричних и громобранских заштитних инсталација, можемо извести следеће закључке:

1. *AFDD* компонента је реаговала у свим случајевима у којима је редни електрични лук (стабилан или нестабилан) био успостављен у струјном колу термичког пријемника (анализирана су оба типа лоших контаката: бакар–месинг и бакар–бакар).
2. *AFDD* компонента је реаговала у свим случајевима у којима је редни електрични лук (стабилан или нестабилан) био успостављен у струјном колу термичког пријемника (на лошем контакту бакар–месинг), иако су на исто струјно коло били прикључени нелинеарни пријемници (микроталасна пећ, клима-уређаји, рачунари, ласерски штампачи и фрижидер) или пријемници који у свом саставу имају колекторски мотор (бушилица, усисивач и фен).
3. *AFDD* компонента није реаговала ни у једном случају када је на струјно коло био прикључен само нелинеарни пријемник или пријемник који у свом саставу има колекторски мотор, или је био прикључен већи број таквих пријемника.

Укратко, испитивања су показала да није било лажног реаговања *AFDD* компоненте, као и да је реаговала увек када је у струјном колу био успостављен редни електрични лук (стабилан или нестабилан). Тиме су практично потврђене карактеристике *AFDD* компоненте декларисане од стране произвођача.

Напоменимо да проблем локације дела струјног кола у коме се појавио редни електрични лук није решен. Ова компонента има задатак само да открије појаву редног електричног лука у одређеном струјном колу и да правовремено искључи његово напајање, чиме се спречава настајање пожара. Улога електричара је да прегледа струјно коло детектовано од стране *AFDD* компоненте и открије место настанка редног електричног лука (потенцијална места на која електричар треба посебно да обрати пажњу су прикључна места електроинсталационих компоненти као што су шуко-утичнице, прекидачи, заштитне компоненте, као и спојеви у разводним кутијама или сабирницама и редним клеммама у разводном орману).

Овакве компоненте представљају будућност у погледу заштите објеката од пожара, јер су у једном уређају интегрисане како заштите од преоптерећења, кратког споја и земљоспоја, тако и заштите од редног и паралелног електричног

лука. Додатно финансијско улагање за инсталирање *AFDD* компоненте може се сматрати прихватљивим, с обзиром на чињеницу да је на тај начин објекат са великом вероватноћом заштићен од пожара које може да изазове квар у електричној инсталацији (инсталирањем овакве компоненте пожар може да изазове само лош електрични контакт).

Компоненте сличне *AFDD*-у треба инсталирати и у стамбеним и у јавним објектима у којима се окупља већи број људи. Такви објекти су, на пример, обданишта, школе, факултети, болнице, спортске хале, робне куће, биоскопи, позоришта итд. Такође их треба инсталирати на свим местима на којима има лако запаљивог или скупљеног материјала (разна складишта и радионице, музеји, галерије, библиотеке итд.).

6 ЗАКЉУЧЦИ

Примарни циљ ове докторске дисертације био је развој нове методе (процедуре) за откривање лоших електричних контаката у нисконапонским електричним инсталацијама. Прегледом литературе је утврђено да у доступним домаћим и страним стандардима, као и у научностручној литератури, постоје технике за рано откривање лошег електричног контакта (акустичка детекција, термовизија), као и неколико патената регистрованих у САД који се односе на електронска кола која у реалном времену врше прикупљање података на основу којих се доноси одлука о постојању лошег електричног контакта. Акустичка детекција представља ефикасно средство за откривање лоших електричних контаката у индустријским постројењима, зато што простирање звучног сигнала кроз многобројне, али непрекидне, бакарне проводнике и сабирнице одликује веома мало слабљење звучног сигнала. Међутим, ова техника није погодна за примену у стамбеним, пословним и јавним објектима, где многобројни контакти уобичајени за њима одговарајуће типове електричних инсталација уносе велико слабљење сигнала. Друга техника – термовизијско снимање – широко је распрострањена метода за превентивно откривање лоших електричних контаката. Међутим, термовизијским прегледом је немогуће открити „вреле“ тачке на лошим електричним контактима када не постоји визуелни контакт између тачке посматрања и инфрацрвеног сензора термовизијске камере. Прва група патентираних уређаја за детекцију „врелих“ тачака користи термичке сензоре који се имплементирају на потенцијално опасним местима (најчешће на прикључним терминалима или стезаљкама) електроинсталационих компоненти и уређаја, како би се исти заштитили од пожара. Друга група патентираних уређаја за детекцију „врелих“ тачака врши праћење промене отпорности (односно пада напона) контакта специјалном електронском мерном опремом. У свим тим случајевима најчешће је реч о селективној заштити скупocene опреме (и њој припадајућој инсталацији) или постројења, тако да примена патентираних уређаја није широко распрострањена у нисконапонским електричним инсталацијама (у таквим случајевима треба инсталирати огроман број сензора како би се заштитили сви електрични контакти у струјним колима). Управо због тога, у дисертацији је

урађено истраживање из кога је требало да проистекне нова метода за откривање лоших електричних контаката, која ће се базирати на електричним мерењима отпорности петље квара и кратког споја која се могу извршити конвенционалним мерним инструментима (тестерима инсталација). Мерење отпорности петље квара се врши периодично, као део поступка верификације квалитета нисконапонских електричних инсталација, како би се проверила ефикасност система аутоматског искључења напајања у случају квара. Полазна хипотеза представљеног истраживања била је да се увођењем додатних електричних мерења у поступку периодичне верификације квалитета нисконапонских електричних инсталација може дефинисати процедура која поузданије детектује струјно коло у коме постоји лош електрични контакт. Истраживање је започело проучавањем утицаја лоших електричних контаката на изазивање „врелих“ тачака које могу да изазову почетни пожар. Проучени су разни физички и хемијски узроци настанка лошег електричног контакта, као и њихов утицај на електричне параметре струјног кола и термичке процесе на анализираним електроинсталационим компонентама. Прве анализе обухватиле су лоше контакте који настају:

- због непотпуног налегања (преклапања) површине бакарног проводника и контактне површине прикључног елемента електроинсталационе компоненте израђеног од разних материјала (бакар, месинг и нерђајући челик – прохром), и

- због редукције момента затезања завртњем изведених прикључака између бакарног проводника и прикључног елемента електроинсталационе компоненте (на утикачу и утичници).

Помоћу специјално конструисане апаратуре експериментално је симулиран лош електрични контакт који настаје услед смањења ефективне површине преклапања контактних површина на електроинсталационим компонентама нових електричних инсталација. У пракси, контактне површине формирају бакарни проводници и прикључни елементи електроинсталационих компоненти (стезалке, папучице, завртњи, клеме...). За најчешће примењене комбинације материјала које се сусрећу на електричним контактима електроинсталационих компоненти (бакар–бакар, бакар–месинг и бакар–нерђајући челик) показано је да електрични контакт бакар–бакар има најповољније особине (без обзира на јачину струје, попречни пресек и процентуално смањење ефективне површине преклапања

температура контакта бакар–бакар била је знатно нижа него код комбинације електрода бакар–месинг и бакар–нерђајући челик, а до успостављања редног електричног лука на овом споју није долазило). Закључено је да је комбинација електрода бакар–нерђајући челик најопаснија као потенцијални узрочник пожара, јер се чак и у случајевима када је површина преклапања електрода 100% успостављају „вреле“ тачке које премашују температуру топљења околне *PVC* изолације. Због тога се на контактне површине од нерђајућег челика најчешће наноси танак слој никла, а ефективне површине контакта у пракси су знатно веће од 4 mm^2 (максимална површина контакта која је испитивана у овом истраживању). У експериментима са комбинацијама електрода бакар–месинг и бакар–нерђајући челик редовно су се појављивале „вреле“ тачке, а потом и редни електрични лук, у свим случајевима њиховог непотпуног преклапања (површине преклапања од 15% и 50% у овом истраживању). Важно је истаћи да је по критеријуму максималне снаге дисипације на „врелој“ тачки опаснија комбинација електрода бакар–нерђајући челик (максимална снага дисипације на овом споју износила је око 63 W, а на споју бакар–месинг око 32 W) – у свим разматраним случајевима поређења су вршена при истој површини попречног пресека електрода, истој ефективној површини преклапања и истој јачини струје. Међутим, када дође до успостављања редног електричног лука, долази до знатног пораста контактне отпорности на споју бакар–месинг (у односу на спој бакар–нерђајући челик, код кога се контактна отпорност при горењу редног електричног лука незнатно повећа). Због тога је снага дисипације на споју бакар–месинг за време горења редног електричног лука знатно већа него на споју бакар–нерђајући челик (минимална вредност за први спој износила је 200 W, а максимална вредност за други спој 65 W). Као што се и очекивало, потврђено је да се код контакта бакар–месинг и бакар–нерђајући челик при истим јачинама струје знатно брже долази до успостављања редног електричног лука са електродама мање површине попречног пресека. Такође, електрични лук се много лакше успостављао за веће јачине струја при истој површини попречног пресека електрода, што се и могло очекивати.

У наставку истраживања, експериментално су проучени топлотни ефекти лоших електричних контаката узрокованих редукијом момента затезања

завртњем изведених прикључака у новим утикачима и утичницама. Три различита момента затезања (1 Nm (одличан контакт), 0,2 Nm (лош контакт) или 0,1 Nm (врло лош контакт)) подешена су на једном завртњем изведеном прикључку утикача или утичнице. Анализирани су бакарни лицнасти проводници стандардних попречних пресека $1,5 \text{ mm}^2$ и $2,5 \text{ mm}^2$, који се користе у утикачима, и бакарни проводници пуног пресека истих попречних пресека, којима се на струјно коло прикључују утичнице. Утврђено је да су неповољнији (достигу опасније „вреле“ тачке при истим условима) лоши контакти у уграђеној електричној инсталацији објекта (која се уобичајено изводи помоћу бакарних проводника пуног пресека) од лоших контаката у напојним кабловима пријемника (по правилу израђених од лицнастих бакарних проводника). Чињеница да су, за исти момент затезања завртња на прикључку утикача и утичнице, нешто веће температуре добијене са бакарним проводницима пуног пресека (у експериментима са утичницама) вероватно се може приписати већој ефективној површини лицнастих проводника на месту контакта (они могу боље да се прилагоде месту прикључка у односу на круте проводнике пуног пресека). Такође, треба истаћи да су прикључци изведени завртњем на утичници и утикачу били различитог типа (типа *M3* у утикачу и типа *M4* у утичници).

Супротно закључку из [76], показано је да намерно макроскопско померање проводника на месту контакта није увек услов да би се појавио усијани спој или знатно повишена температура на лошем контакту. Ако су у струјном колу успостављене веће јачине струје и ако оне довољно дуго трају, а притом је редукација момента затезања завртња на прикључку (утикача или утичнице) значајна (момент затезања 0,1 Nm), може се појавити опасност од почетног пожара и без макроскопског померања проводника. Наравно, микроскопски помераји жица на месту електричног контакта, изазвани грејањем и хлађењем, као и присуством вибрација из околине, сигурно постоје и доприносе настанку лошег контакта. Резултати извршених експеримената су показали да се деградација лошег контакта насталог услед смањеног момента затезања на завртњем изведеном прикључку повећава са растом површинског слоја оксида формираних на контактної површини (уз то, праћена је сталним повећањем отпорности контакта). Још један важан закључак у овом истраживању био је да редукација

температуре контакта приликом његовог хлађења практично није утицала на отпорност лошег контакта. Са сваким новим успостављањем струје, отпорност контакта је наставила да расте и врло брзо је достигано стање „вреле“ тачке на контакту.

Експериментално је такође показано да лош контакт на новој електричној инсталацији, чија је електрична отпорност већа од $80 \text{ m}\Omega$, представља претњу по безбедност (електрична отпорност већа од $80 \text{ m}\Omega$ указује на вероватно постојање „вреле“ тачке). Да би се спречио почетни пожар, закључено је да замену утичнице (или притезање завртња на месту прикључка) треба обавити пре него што електрична отпорност контакта достигне $250 \text{ m}\Omega$.

Применом тренутно важећих стандарда и правилника [27,28] којима је уређена област верификације квалитета нисконапонских електричних инсталација, могу да се детектују поједина неисправна струјна кола, док поједини лоши контакти остају неоткривени. У завршном дефинисању методе за откривање лоших електричних контаката анализирани су наведени недостаци постојећих процедура. При томе су коришћени подаци добијени верификацијом квалитета нисконапонских електричних инсталација на терену (коришћени су стручни налази које је претходних десет година израдила Лабораторија за испитивање нисконапонских електричних и громобранских заштитних инсталација Електротехничког факултета у Београду) и резултати мерења добијени експерименталним путем у лабораторији. Експериментално су анализирани ефекти редукције момента затезања проводника на прикључку изведеном завртњем на његово загревање и електричну отпорност, како на једној старој (око 30 година коришћеној) утичници тако и на две нове утичнице, али са намерно кородираним спојевима. Да би се убрзао процес корозије, у једној од нових утичница један од прикључака (фазног проводника) третиран је царском водом (концентрирана HNO_3 : концентрирана $\text{HCl} = 1:3 \text{ (v / v)}$), а у другој новој утичници један од прикључака (неутралног проводника) третиран је концентрованом сумпорном киселином H_2SO_4 . Коришћењем ових хемикалија симулиран је ефекат дуготрајног излагања електричних контаката електроинсталационих компоненти киселој атмосфери. Закључено је да се нови, али намерно кородирани, прикључци

изведени завртњем на утичницама могу користити за симулацију како пораста температуре тако и електричне отпорности дуго коришћених (старих) утичница.

Након завршене анализе експеримената спроведених у лабораторији, приступило се анализи резултата мерења остварених на терену како би се прецизирала метода за откривање лоших електричних контаката. Она се заснива на успостављању корелације између измерених вредности електричне отпорности петље квара и кратког споја и степена погоршања контакта, односно повећања његове електричне отпорности. Закључено је да се мерењем не само отпорности петље квара (R_{SL-PE}) већ и отпорности кратког споја (R_{SL-N}) може дефинисати процедура за рано откривање лошег електричног контакта. Корелација резултата мерења добијених експериментално у лабораторији и резултата добијених на терену показала је да се отпорност за $0,5 \Omega$ већа од највеће измерене отпорности R_{SL-PE} (R_{SL-N}) на околним утичницама може препоручити као гранична отпорност (R_{lim}) која показује да ли постоји лош електрични контакт у одговарајућем струјном колу.

Главни научни допринос дисертације је нова метода (процедура у оквиру периодичне верификације квалитета нисконапонских електричних инсталација) за откривање лоших електричних контаката, на основу мерења отпорности петље квара R_{SL-PE} и петље кратког споја R_{SL-N} и њиховог поређења са R_{lim} . За одговорно лице које врши верификацију нисконапонских електричних инсталација на терену додатно мерење отпорности кратког споја (R_{SL-N}) продужило би време испитивања једне шуко-утичнице конвенционалним инструментом за само пет секунди, па се може закључити да примена нове методе није захтевна у погледу дужине трајања испитивања. Табела 32 садржи процедуру за откривање потенцијалних локација лоших електричних контаката и могуће опасности од пожара у свим ситуацијама које могу настати у пракси (на терену). Наведену процедуру треба применити у свим случајевима у којима је измерена отпорност петље квара R_{SL-PE} мања од одговарајуће максималне дозвољене отпорности петљи квара R_{sMAX} , која обезбеђује ефикасно деловање примењене класичне заштитне компоненте у случају квара у TN систему заштите (у супротном случају, одговарајуће струјно коло би у редовној процедури било проглашено неисправним због опасности од електричног удара).

Напоменимо да нова процедура за детекцију лоших електричних контаката у нисконапонским електричним инсталацијама важи за оба типа утичница (монофазне и трофазне). Разлика је у томе што се у случају трофазне утичнице мора извршити мерење R_{SL-PE} и R_{SL-N} за сваки фазни проводник, а добијени резултати се анализирају на исти начин као и за монофазне утичнице. После верификације у којој је примењена нова процедура, као провера да ли су лоши електрични контакти елиминисани акцијом електричара или техничке службе, неопходно је поново измерити отпорности петље квара R_{SL-PE} и кратког споја R_{SL-N} у тим струјним колима и проверити да ли њихове новеизмерене вредности испуњавају услове за струјно коло без лошег електричног контакта.

Примена нове процедуре је ограничена на *TN* систем заштите, који је најчешће примењен систем заштите од електричног удара у случају квара. Такође, треба нагласити да се неки лоши контакти не могу открити применом нове процедуре. На пример, не могу да се детектују лоши контакти у новим нисконапонским електричним инсталацијама. Разлог томе је чињеница да деградација контакта на новој електричној инсталацији (који може да изазове „врелу“ тачку) постоји и када је његова отпорност само $80 \text{ m}\Omega$, а тако мале промене отпорности у струјном колу не могу се детектовати мерењем. Због тога, применом нове методе у случају испитивања нових електричних инсталација одговорно лице које врши верификацију нисконапонских електричних инсталација може извести погрешан закључак (на основу измерених малих отпорности R_{SL-PE} и R_{SL-N}) да је инсталација исправна, иако у њој постоји олабављена веза (најчешће је то лош електрични контакт настао услед непрофесионалног рада електричара). Такође, применом нове процедуре ни на старим (коришћеним) електричним инсталацијама не могу да се детектују лоши електрични контакти у струјним колима неких фиксних пријемника (као што су нпр. светиљке), јер се код њих не примењује редовна процедура мерења отпорности петље квара R_{SL-PE} (не постоји опасност од електричног удара, јер је светиљка ван домашаја руке, а у појединим струјним колима осветљења није ни изведен заштитни проводник).

Предложена метода за откривање лошег електричног контакта успешно је примењена приликом вршења верификације квалитета нисконапонских

електричних инсталација у стамбеним јединицама различите старости (10–60 година). У неколико струјних кола применом нове методе су детектовани лоши електрични контакти.

На крају истраживања су представљени резултати експерименталног испитивања функционалности *AFDD* компоненте, која треба да препозна јединствене карактеристике горења редног електричног лука и да после тога струјно коло у коме се он појавио искључи са мрежног напајања. Испитивања су показала да није било лажног реаговања *AFDD* компоненте, као и да је до његовог реаговања увек долазило када је у струјном колу био успостављен редни електрични лук (стабилан или нестабилан). Тиме су практично потврђене карактеристике *AFDD* компоненте декларисане од стране произвођача. Због тога је дата препорука да компоненте сличне *AFDD*-у треба инсталирати како у стамбеним, тако и у јавним објектима у којима се окупља већи број људи. Такви објекти су, на пример, обданишта, школе, факултети, болнице, спортске хале, робне куће, биоскопи, позоришта итд. Такође их треба инсталирати на свим местима на којима има лако запаљивог или скупог материјала (разна складишта и радионице, музеји, библиотеке итд.).

Резултати истраживачког рада који представљају главне научне доприносе докторске дисертације објављени су у научним часописима са *JCR* листе [88,89,98]. Неки делови истраживачког рада објављени су у домаћим часописима [25,66] или су представљени на домаћим научним конференцијама [17,21,26,64].

Нова метода ће се у будућности примењивати у свим периодичним верификацијама квалитета нисконапонских електричних инсталација које буде вршила Лабораторија за испитивање нисконапонских електричних и громобранских заштитних инсталација Електротехничког факултета у Београду. Очекује се да се временом, кроз израђене стручне налазе о верификацији квалитета нисконапонских електричних инсталација, прикупи довољно резултата мерења који ће се употребити за успостављање везе између старости грађевинских објеката (тачније, старости њихових електричних инсталација) и вероватноће настанка опасне „вреле“ тачке на лошем електричном контакту у струјним колима монофазних и трофазних пријемника.

Лабораторија за испитивање нисконапонских електричних и громобранских заштитних инсталација радиће на промоцији нове методе за рано откривање лоших електричних контаката. Нова метода ће бити представљена на стручним саветовањима и семинарима чија је тема превентивна заштита од пожара, како код нас тако и у иностранству. Такође, фирмама које врше верификацију квалитета нисконапонских електричних инсталација, кроз кратко упутство и примере, биће представљена практична примена нове методе за детекцију лоших електричних контаката. Претпоставља се да ће због једноставности примене и веома малог продужења времена испитивања у односу на стандардну процедуру са конвенционалним мерним инструментом (мерење је по утичници дуже за око пет секунди) нова метода ускоро почети широко да се примењује.

Лабораторија за испитивање нисконапонских електричних и громобранских заштитних инсталација Електротехничког факултета у Београду обратиће се и Интернационалној електротехничкој комисији (*International Electrotechnical Commission – IEC*), која доноси стандарде из области верификације квалитета нисконапонских електричних инсталација, како би указала на недостатке постојећих процедура због којих не могу да се детектују многи лоши електрични контакти, као и на чињеницу да ће број недетектованих лоших контаката бити много мањи уколико се примени нова процедура која ће представљати додатак стандардној процедури.

Даље истраживање може да обухвати бројне експерименте који могу да помогну у откривању узрока пожара на електричним инсталацијама. У једној групи експеримената би се постигло да се електроинсталационе компоненте (нпр. утичнице) запале услед постојања лошег електричног контакта или редног електричног лука, а у другој групи експеримената извршило би се паљење електроинсталационе компоненте истог типа у одговарајућој лабораторијској пећници. Анализом трагова пожара на ове две компоненте вероватно је могуће донети закључке који могу допринети побољшању квалитета вештачења насталих пожара, тј. утврђивању да ли је пожар настао услед лошег електричног контакта на електроинсталационој компоненти или је компонента изгорела у пожару чији је узрок непознат. Резултати таквог истраживања много би значили инспекторима

Сектора за ванредне ситуације, Управе за превентивну заштиту од пожара Републике Србије који врше вештачења великих пожара.

Примена нове процедуре је ограничена на *TN* систем заштите, који је најчешће примењен систем заштите од електричног удара у случају квара. Простор за даље истраживање може да буде рад на усавршавању нове методе како би она могла успешно да се примењује и у *TT* систему заштите, који је више заступљен у руралним подручјима, где се за напајање најчешће користи ваздушна дистрибутивна мрежа.

Уколико се лош електрични контакт не детектује на време, и уколико пређе у прогресиван квар (редни електрични лук) пре него што изазове пожар, инсталирањем компоненте сличне *AFDD*-у описане у последњем поглављу, редни електрични лук се на време може детектовати и прекинути напајање струјног кола. Због тога ће се промовисати уградња ових компонената како у стамбеним тако и у јавним и пословним објектима у којима се окупља велики број људи.

7 ЛИТЕРАТУРА

- [1] Barnett, M., Bruck, D., Jago, A., Mean annual probability of having a domestic fire experience throughout a lifetime: development and application of a methodology, 7th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology, Hong Kong, 2007.
- [2] European statistics and potential fire safety measures, Final report, January 2009.
- [3] Reports of DTI – Department of Trade and Industry in London, 1996-1999.
- [4] CBS Brandweerstatistiek 2002, Centraal Bureau voor de Statistiek, Voorburg, the Netherlands, 2003.
- [5] CTIF World Fire Statistics, Report No. 10, Centre of Fire Statistics of CTIF, Belgium, 2006.
- [6] Babrauskas V., How Do Electrical Wiring Faults Lead to Structure Ignitions?, Proc. Fire and Materials 2001 Conf., Interscience Communications Ltd., London (2001), 39–51.
- [7] European Copper Institute, Overview of electrical safety in 11 countries, Barcelona, 2002.
- [8] U.S. Fire Administration National Fire Data Center, Residential Building Electrical Fires, Topical Fire Report Series, Volume 8, Issue 2, March 2008.
- [9] Holborn, P.G., Nolan, P.F., Golt, J., An analysis of fatal unintentional dwelling fires investigated by London Fire Brigade between 1996 and 2000, Fire Safety Journal (2003) 1–42.
- [10] Miller, I., Human Behaviour Contributing to Unintentional Domestic fire Deaths 1997-2003, New Zealand Fire Service Commission Research Report Number 47, Heimdall Consulting Ltd, New Zealand, 2005.
- [11] DTI, Electric Blanket Fires and Related Injuries, Home Office, Department of Trade & Industry, London, 1999.
- [12] US-CPSC, Clothes dryer project, Final report on electric and gas clothes dryers, United States Consumer Products Safety Commission, Washington, 2000.
- [13] VWA, Brandveiligheid wasdrogers. Rapportnummer ZW2002 wwh03/ZW2003 R003, Zwijndrecht, The Netherlands, 2004.

- [14] DTI, TV fires Europe, Home Office, Department of Trade & Industry, London, 1996.
- [15] DTI, Causes of fires involving television sets in dwellings, Consumer affairs directorate, Department of trade and industry, London, 2001.
- [16] Костић М., Теорија и пракса пројектовања електричних инсталација – треће, проширено издање, Академска мисао, Београд, 2014.
- [17] Хаџиефендић Н., Давидовић М., Костић Н., Зарев И., Пожари на електричним инсталацијама изазвани лошим електричним контактом на прикључцима електроинсталационих компоненти, Четврта регионална конференција Примењена заштита и њени трендови, Златибор 2017, сс. 178–188.
- [18] Gillman T.H., Le May I., Mechanical and Electrical Failures Leading to Major Fires, *Engineering Failure Analysis* 14 (2007) 995–1018.
- [19] Хот Е., Електрично загревање, Светлост, Сарајево, 1989.
- [20] SINTEF, Fire in electrical installations, Norwegian Institute of Technology, January 28, 2008.
- [21] Костић М., Хаџиефендић Н., Трифуновић Ј., Термовизијска детекција лоших контаката и AFCI техника прекидања редног електричног лука, Зборник радова II саветовања у области заштите од пожара, Београд 2013, сс. 25–42.
- [22] Хаџиефендић Н., Штетни ефекти појаве редног електричног лука у нисконапонским електричним инсталацијама, Магистарски рад, Електротехнички факултет у Београду, 2002.
- [23] Hadziefendic N., Kostic M., Radakovic Z., Detection of series arcing in low-voltage electrical installations, *European Transactions on Electrical Power* 19 (2009) 423–432.
- [24] Shea J., Identifying causes for certain types of electrically initiated fires in residential circuits, *Fire and Materials* 35 (2011) 19–42.
- [25] Зарев И., Хаџиефендић Н., Откривање редног електричног лука у нисконапонским електричним инсталацијама употребом савремених заштитних компоненти, *Техника*, Вол. 69, бр. 4, 2014, сс. 637–644.
- [26] Ђенић Н., Зарев И., Костић Н., Хаџиефендић Н., Трифуновић Ј., Живановић Ј., Значај могућности раног откривања лоших електричних контаката као

могућег узрочника пожара термовизијским прегледом, Шесто саветовање
Управљање ризицима, Пожаревац 2018, сс. 65–80.

- [27] SRPS HD 60364-6, Електричне инсталације ниског напона, Део 6: Верификација, 2012.
- [28] Правилник о техничким нормативима за електричне инсталације ниског напона (Службени лист СФРЈ, бр. 53/88, 54/88, 28/95).
- [29] Standard for Infrared Inspection of Electrical Systems & Rotating Equipment, 2008.
- [30] Maintenance Testing Specifications for Electric Power Distribution Equipment and Systems, ANSI/NETA, 2015.
- [31] Лабораторија за испитивање нисконапонских електричних и громобранских заштитних инсталација, Стручни налази о извршеним термовизијским снимањима (одговорно лице: Неџад Хациефендић), 2013–2018.
- [32] Gregory G.D, Scott G.W., The arc-fault circuit interrupter: an emerging product, IEEE Transactions on Industry Applications 34 (1998) 928–933.
- [33] NFPA 70, National Electrical Code (NEC) Handbook, 2005 Edition.
- [34] www.siemens.com/lowvoltage/afdd
- [35] <http://www.scribd.com/doc/41878179/BS-7671-2008>
- [36] <http://www.mod.uk/NR/rdonlyres/4D651798-CE29-4F0F1182387685BCDA/0/pg0309.pdf>
- [37] <http://www.scribd.com/doc/47993912/GN3-Inspection-Testing>
- [38] <http://www.tlc-direct.co.uk/Book/8.2.3.htm>
- [39] <http://www.scribd.com/doc/39375547/ASN-ZS-3000-2007.pdf>
- [40] <http://www.nfpa.org/assets/files/PDF/ROP/70b-A2002-rop.pdf>
- [41] <http://www.nfpa.org/catalog/>
- [42] http://www.magnelectric.com/site/pdfs/Electrical_Maintenance_A_Critical_Part_of_Worker_Safety.pdf
- [43] National Electrical Code (NEC) 2005 Handbook
- [44] http://ceenews.com/mag/electric_ac_loop_impedance/
- [45] <http://cadial.hidra.hr>
- [46] Cawlfild S., Infrared knowledge management, http://www.irinfo.org/articles/article_10_1_2006_cawlfild.html

- [47] Давидовић М., Хаџиефендић Н., Трифуновић Ј., Опасност од настанка пожара услед коришћења електроинсталационих компоненти лошег квалитета – продужни каблови, *Безбедност*, Вол. 55, бр. 1, 2013, сс. 140–159.
- [48] Хаџиефендић Н., Радаковић З., Трифуновић Ј., Електричне инсталације – чест узрок пожара, *Зборник радова I саветовања у области заштите од пожара*, Београд 2008, сс. 111–122.
- [49] Препоруке за извођење и правилно коришћење нисконапонских електричних и громобранских заштитних инсталација и развој методологије за верификацију њиховог квалитета са аспекта заштите грађевинских објеката од пожара (учесник на пројекту: Неџад Хаџиефендић), пројекат Министарства просвете, науке и технолошког развоја, бр. ТР 36018, 2011–2019.
- [50] Лабораторија за испитивање нисконапонских електричних и громобранских заштитних инсталација, Стручни налаз периодичног прегледа нисконапонских електричних инсталација (одговорно лице: Неџад Хаџиефендић), Наручилац: Клуб студената технике КСТ, ул. Булевар краља Александра 73, Београд, 2010.
- [51] Лабораторија за испитивање нисконапонских електричних и громобранских заштитних инсталација, Стручни налаз периодичног прегледа нисконапонских електричних инсталација (одговорно лице: Неџад Хаџиефендић), Наручилац: ЕДБ Јавно осветљење, ул. Булевар краља Александра 73а, Београд, 2010.
- [52] Лабораторија за испитивање нисконапонских електричних и громобранских заштитних инсталација, Стручни налаз периодичног прегледа нисконапонских електричних инсталација (одговорно лице: Неџад Хаџиефендић), Наручилац: Нови завод затвореног типа за смештај осуђених лица у Падинској Скели, Зрењанински пут бб, кп 1770/1 КО Ковилово, Општина Палилула, Београд, 2011.
- [53] Лабораторија за испитивање нисконапонских електричних и громобранских заштитних инсталација, Стручни налаз периодичног прегледа нисконапонских електричних инсталација (одговорно лице: Неџад

Хациефендић), Наручилац: Грађевински факултет Универзитета у Београду, ул. Булевар краља Александра 73, Београд, 2011.

- [54] Лабораторија за испитивање нисконапонских електричних и громобранских заштитних инсталација, Стручни налаз периодичног прегледа нисконапонских електричних инсталација (одговорно лице: Неџад Хациефендић), Наручилац: Архитектонски факултет Универзитета у Београду, ул. Булевар краља Александра 73, Београд, 2011.
- [55] Лабораторија за испитивање нисконапонских електричних и громобранских заштитних инсталација, Стручни налаз периодичног прегледа нисконапонских електричних инсталација (одговорно лице: Неџад Хациефендић), Наручилац: Електроисток изградња д.о.о., Хусинских рудара 19, Београд, 2011.
- [56] Лабораторија за испитивање нисконапонских електричних и громобранских заштитних инсталација, Стручни налаз периодичног прегледа нисконапонских електричних инсталација (одговорно лице: Неџад Хациефендић), Наручилац: Електроисток изградња д.о.о., Булевар 12. фебруара 79, Ниш, 2011.
- [57] Лабораторија за испитивање нисконапонских електричних и громобранских заштитних инсталација, Стручни налаз периодичног прегледа нисконапонских електричних инсталација (одговорно лице: Неџад Хациефендић), Наручилац: Факултет спорта и физичког васпитања, Благоја Паровића 156, Београд, 2012.
- [58] Лабораторија за испитивање нисконапонских електричних и громобранских заштитних инсталација, Стручни налаз периодичног прегледа нисконапонских електричних инсталација (одговорно лице: Неџад Хациефендић), Наручилац: Електротехнички факултет Универзитета у Београду, Булевар краља Александра 73, Београд, 2012.
- [59] Лабораторија за испитивање нисконапонских електричних и громобранских заштитних инсталација, Стручни налаз периодичног прегледа нисконапонских електричних инсталација (одговорно лице: Неџад Хациефендић), Наручилац: Кућа хране Лазаревић, Цвијићева 39, Земун, 2013.

- [60] Babrauskas V., Mechanisms and modes for ignition of low-voltage, PVC-insulated electrotechnical products, *Fire and Materials* 30 (2006) 151–174.
- [61] Радаковић З., Костић М., Хаџиефендић Н., Детекција редног електричног лука у нисконапонским електричним инсталацијама, *Електродистрибуција Београд*, Год. 31, бр. 1, 2003, сс. 15–23.
- [62] Костић Н., Хаџиефендић Н., Развој уређаја за детекцију редног електричног лука, његова комерцијализација и трансфер нове технологије у индустрији, 13. Међународна конференција Заштите од пожара и експлозије, Нови Сад 2012, сс. 345–354.
- [63] Радаковић З., Хаџиефендић Н., Детектор редног електричног лука, *Зборник радова I саветовања у области заштите од пожара*, Београд 2008, сс. 123–130.
- [64] Хаџиефендић Н., Таталовић А., Давидовић М., Вукајловић В., Трифуновић Ј., Могућност унапређења заштите објеката од пожара инсталирањем компоненти за детекцију редног електричног лука, *Зборник радова III саветовања у области заштите од пожара*, Београд 2013, сс. 45–66.
- [65] Развој уређаја за детекцију редног електричног лука у нисконапонским електроенергетским инсталацијама (учесник на пројекту: Нецад Хаџиефендић), пројекат Министарства науке и заштите животне средине, бр. ТР 17006, 2008 – 2009.
- [66] Хаџиефендић Н., Трифуновић Ј., Костић Н., Костић М., Анализа утицаја лоших контаката у електричним инсталацијама на изазивање пожара, *Техника*, Вол. 68, бр. 1, 2013, сс. 81–87.
- [67] Chung S.C., Hyang K.K., Dong O.K., The properties variation of PVC insulated plug damaged by poor contact, *Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, Nagoya, Japan 2003, 431–434.
- [68] Shea J., Glowing contact physics, *Proceedings of the 52nd Holm Conference on Electrical Contacts*, Montreal, Canada 2006, 48–57.
- [69] Shea J., Zhou X., Material effect on glowing contact properties, *Proceedings of the 53rd Holm Conference on Electrical Contacts*, Pittsburgh, USA 2007, 90–97.

- [70] Sletbak J., Kristensen R., Sundklakk H., Navik G., Runde M., Glowing contact areas in loose copper wire connections, *IEEE Transactions on Components, Hybrids and Manufacturing Technology* 15 (1992) 322–327.
- [71] Shea J., Identifying causes for certain types of electrically initiated fires in residential circuits, *Fire and Materials* 35 (2011) 19–42.
- [72] Shea J., Conditions for series arcing in PVC wiring, *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies* 30 (2007) 532–539.
- [73] Zhou X., Hastings J., Schoepf T., Application feasibility of detecting glowing contacts using acoustic sensing technology, *Proceedings of the 55th Holm Conference on Electrical Contacts*, Vancouver, Canada 2009, 1–7.
- [74] M. Benfer and D. Gottuk, "Development and analysis of electrical receptacle fires", NIJ-2010-DNBX-K218, Baltimore, MD, 2013.
- [75] M. Benfer and D. Gottuk, Electrical receptacles – overheating, arcing, and melting, in *FSS 2014*, University of Canterbury, NZ, 2014, 1010–1023.
- [76] J.L. Ferrino-McAllister, R.J. Roby, and J.A. Milke, Heating at electrical contacts: characterizing the effects of torque, contact area, and movement on the temperature of residential receptacles, *Fire Technol.* 42 (2006) 49–74.
- [77] Костић Н., Вуковић М., Хаџиефендић Н., Методологија за превентивне периодичне прегледе нисконапонских електричних инсталација у зградама, *Техника*, Вол. 68, бр. 2, 2013, сс. 285–292.
- [78] M. Braunovic, V.V. Konchits, and N.K. Myshkin, Reliability issues in electrical contacts, in: *Electrical Contacts: Fundamentals, Applications and Technology*, Boca Raton, USA, 2006.
- [79] T. Kuroyanagi, S. Inoue, and H. Suzuki, Glowing phenomena of copper and copper materials and their electrical characteristics, *Copper Promotion Technical Research Group Journal* 20 (1981) 198–204.
- [80] V. Babrauskas, Electrical fires, in: *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 5th ed. New York, USA, 2016.
- [81] S. Taib, M.S. Jadin, and S. Kabir, Thermal imaging for enhancing inspection reliability: detection and characterization, in: *Infrared Thermography*, Rijeka, Croatia, 2012.

- [82] C. Wilson, G. McIntosh, and R.S. Timsit, Contact spot temperature and the temperature of external surfaces in an electrical connection, in ICEC 2012, Beijing, China, 2012, 12–17.
- [83] J.J. Shea and X. Zhou, Material effect on glowing contact properties, IEEE T. Compon. Pack. T. 32 (2009) 734–740.
- [84] W.J. Meese and R.W. Beausoliel, Exploratory study of glowing electrical connections, Natl. Bur. Stand. Build. Sci. Ser. 103 (1977)1–22.
- [85] D. Newbury and S. Greenwald, Observations on the mechanisms of high resistance junction formation in aluminum wire connections, J Res. Nat. Bur. Stand. 85 (1980) 429–440.
- [86] J.R. Hall. (2013, April). Home electrical fires. NFPA, USA. [Online]. Available: <http://www.nfpa.org/~media/files/news-and-research/fire-statistics/major-causes/oshomeelectricalfires.pdf?la=en>
- [87] P.G. Slade, The Consequences of Arcing, Ch. 10 in: Electrical Contacts, 2nd ed., P.G. Slade, ed., CRC Press, Boca Raton, USA, 2017.
- [88] N. Hadziefendic, M. Davidovic, V. Djordjevic, and M. Kostic, The impact of an incomplete overlap of a copper conductor and the corresponding terminal on the contact temperature, IEEE T. Compon. Pack. T. 7 (2017) 1644–1654.
- [89] N. Hadziefendic, J. Trifunovic, and M. Kostic, Effects of a reduced torque on heating of electrical contacts in plugs and receptacles, IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology 8 (2018) 1905–1913.
- [90] W.J. Meese and R.W. Beausoliel, Exploratory study of glowing electrical connections, Natl. Bur. Stand. Build. Sci. Ser. 103 (1977) 1–22.
- [91] T. Kuroyanagi, S. Inoue, and H. Suzuki, Glowing phenomena of copper and copper materials and their electrical characteristics, Copper Promotion Technical Research Group Journal 20 (1981)198–204.
- [92] P. Müller, S. Tenbohlen, and R. Maier, Current characteristics of serial and parallel low current arc faults in distribution networks, in CIRED, Frankfurt, Germany, 2011, Paper No. 0181.
- [93] B. Maas, H. Krompholz, M. Kristiansen, and M. Hagler, Arc current, voltage, and resistance in a high energy, gas filled spark gap, in 5th IEEE Pulsed Power Conference, Arlington, USA, 1985, 99–101.

- [94] J.J. Shea, Method and apparatus for detecting a glowing contact in a power circuit, U.S. Patent 8 854 066 B2, Oct. 7, 2014.
- [95] J.C. Engel, Electrical switching apparatus including glowing contact protection, U.S. Patent 6 707 652 B2, Mar. 16, 2004.
- [96] M. Baxter, G. Spacht, and B. Baxter, Systems and methods for reducing electrically-caused fires in wiring devices, U.S. Patent 8 139 337 B2, Mar. 20, 2012.
- [97] X. Zhou, J. Hastings, and T.J. Schoepf, Application feasibility of detecting glowing contacts using acoustic sensing technology, in Proc. Holm, Vancouver, British Columbia, Canada, Sep. 2009, 1–7.
- [98] N. Hadziefendic, N. Kostic, J. Trifunovic, M. Kostic, Detection of poor contacts in low-voltage electrical installations, *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology* 9 (2019) 129–137.
- [99] M.W. Earley, J.S. Sargent, C.D. Coache, and R.J. Roux, *National Electrical Code Handbook*, Quincy, Mass: National Fire Protection Association, 2011.
- [100] IEC 60884, Plugs and socket-outlets for household and similar purposes, standard series, 2017.
- [101] Low-voltage electrical installations – Part 6: Verification, document IEC 60364-6, 2016.
- [102] Low-voltage electrical installations – Part 4-41: Protection for safety – Protection against electric shock, document IEC 60364-4-41, 2005.
- [103] Electrical safety in low voltage distribution systems up to 1000 V a.c. and 1500 V d.c. - Equipment for testing, measuring or monitoring of protective measures - Part 3: Loop impedance, document IEC 61557-3, 2007.
- [104] S. Glass, C. Mowry, and N. Sorensen, Report on study of electrical component corrosion related to problem drywall, document SAND2011-1539, Sandia National Laboratories, USA, 2011.
- [105] J. P. Franey and T. E. Graedel, Corrosive effects of mixtures of pollutants, *JAPCA J. Air Waste Ma.* 35 (1985) 644–648.
- [106] D. Đorđević, A. Mihajlidi-Zelić, D. Relić, Lj. Ignjatović, J. Huremović, A. M. Stortini and A. Gambaro, Size-segregated mass concentration and water soluble

inorganic ions in an urban aerosol of the Central Balkans (Belgrade), *Atmos. Environ.* 46 (2012) 309–317.

- [107] Fluke. Fluke Ti125 industrial-commercial infrared camera. [Online]. Available: <http://en-us.fluke.com/products/infrared-cameras/fluke-ti125-infrared-camera-30-hz.html#techspecs>
- [108] E.D. Bunten, J.L. Donaldson, E.C. McDowell, Hazard assessment of aluminum electrical wiring in residential use (NBSIR 75-677), National Bureau of Standards, 1974.
- [109] Scrap metal marketplace. Scrap metal prices. [Online]. Available: <http://www.scrapmonster.com>
- [110] Plugs and socket-outlets for domestic and similar general use standardized in member countries of IEC, IEC TR 60083, 2015.
- [111] Low-voltage electrical installations – Part 5-52: Selection and erection of electrical equipment – Wiring systems, IEC 60364, 2012.
- [112] The European Council of Vinyl Manufacturers. Heat Distortion Temperature (softening temperature). [Online]. Available: <http://www.pvc.org/en/p/heat-distortion-temperature-softening-temperature>
- [113] Wikipedia. Polyvinyl chloride. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Polyvinyl_chloride
- [114] V. Babrauskas, Mechanisms and modes for ignition of low-voltage PVC wires, cables, and cords, *Fire & Materials*, Interscience Communications Ltd., London, UK, 2005, 291–309.
- [115] G. Wypych, Reliability issues in electrical contacts, in: *PVC Degradation and Stabilization*, Elsevier, 2015.
- [116] Low-voltage fuses - Part 1: General requirements, document IEC 60269-1, 2006.
- [117] Electrical accessories – Circuit-breakers for overcurrent protection for household and similar installations – Part 1: Circuit-breakers for a.c. operation, document IEC 60898-1, 2015.

ПРИЛОГ 1

Статистички подаци о пожарима у Републици Србији (расподела према објекту-простору настанка пожара, узроцима настајања и материјалној штети)

Табела 1. Статистички подаци о пожарима за Републику Србију / расподела према објекту-простору

| <i>Година</i> | <i>Укупан број пожара и експлозија</i> | <i>Према објекту-простору</i> | | |
|---------------|--|--|--|---|
| | | <i>Број пожара на грађевинским објектима</i> | <i>Број пожара на отвореном простору</i> | <i>Број пожара на саобраћајним средствима</i> |
| 1998 | 5432 | 3098 | 1675 | 659 |
| 1999 | 3670 | 2572 | 531 | 567 |
| 2000 | 6641 | 3161 | 2750 | 730 |
| 2001 | 4055 | 2627 | 736 | 692 |
| 2002 | 4895 | 2768 | 1347 | 780 |
| 2003 | 5393 | 2947 | 1679 | 767 |
| 2004 | 5108 | 2758 | 1507 | 843 |
| 2005 | 5259 | 2825 | 1522 | 912 |
| 2006 | 5712 | 2937 | 1898 | 877 |
| 2007 | 6948 | 3146 | 2858 | 944 |
| 2008 | 6561 | 3090 | 2534 | 937 |
| 2009 | 6168 | 3115 | 2138 | 915 |

Табела 2. Статистички подаци о пожарима за Републику Србију / узроци настајања

| Година | Укупан број пожара и експлозија | Узроци настајања | | | | | | | | | | | | Неутврђено |
|--------|---------------------------------|-------------------------|--------------------|-------------------|----------------|--------------------|-----------------------------|------------------------------|-------------|--------------------------------|--------------|----------------------|---------------|------------|
| | | Конструкциони недостаци | Оштећења и кварови | Ложишта и огњишта | Отворен пламен | Опушак од цигарета | Заваривање, резање, лемљење | Електрични апарати и уређаји | Кратак спој | Проводници услед преоптерећења | Самозапалење | Атмосферско пражњење | Остали узроци | |
| 1998 | 5432 | 63 | 104 | 375 | 2773 | 140 | 66 | 496 | 1033 | 57 | 33 | 33 | 214 | 45 |
| 1999 | 3670 | 51 | 68 | 249 | 1427 | 97 | 59 | 395 | 806 | 51 | 27 | 45 | 279 | 116 |
| 2000 | 6641 | 55 | 102 | 290 | 4071 | 225 | 83 | 456 | 887 | 58 | 33 | 36 | 226 | 119 |
| 2001 | 4055 | 57 | 86 | 281 | 1789 | 136 | 60 | 438 | 837 | 63 | 26 | 36 | 171 | 75 |
| 2002 | 4895 | 45 | 114 | 295 | 2495 | 138 | 49 | 478 | 869 | 60 | 26 | 46 | 190 | 90 |
| 2003 | 5393 | 53 | 118 | 338 | 2903 | 159 | 64 | 440 | 926 | 50 | 24 | 42 | 162 | 114 |
| 2004 | 5108 | 48 | 95 | 394 | 2717 | 117 | 70 | 422 | 914 | 49 | 25 | 23 | 170 | 64 |
| 2005 | 5259 | 81 | 94 | 368 | 2589 | 90 | 64 | 412 | 1085 | 46 | 21 | 38 | 216 | 155 |
| 2006 | 5712 | 226 | 68 | 315 | 2968 | 98 | 57 | 253 | 1191 | 37 | 26 | 51 | 147 | 275 |
| 2007 | 6948 | 32 | 96 | 177 | 2405 | 110 | 39 | 151 | 588 | 31 | 37 | 39 | 158 | 3085 |
| 2008 | 6561 | 26 | 86 | 182 | 2819 | 115 | 48 | 180 | 695 | 44 | 18 | 56 | 157 | 2135 |
| 2009 | 6168 | 38 | 98 | 385 | 2763 | 72 | 44 | 314 | 685 | 46 | 26 | 63 | 186 | 1448 |

Табела 3. Статистички подаци о пожарима за Републику Србију / материјална штета

| Година | Укупан број пожара и експлозија | Интервална граница материјалне штете у хиљадама динара | | | | | | |
|--------|---------------------------------|--|-------|--------|----------|-----------|------------|-------------|
| | | Без штете | До 10 | 11-100 | 101-1000 | 1001-5000 | 5001-10000 | Преко 10000 |
| 1998 | 5432 | 2892 | 1754 | 686 | 88 | 7 | 1 | 4 |
| 1999 | 3670 | 1754 | 1108 | 642 | 151 | 11 | 2 | 2 |
| 2000 | 6641 | 3682 | 1250 | 1270 | 398 | 30 | 6 | 5 |
| 2001 | 4055 | 1867 | 609 | 1116 | 410 | 39 | 6 | 8 |
| 2002 | 4895 | 2575 | 574 | 1242 | 457 | 36 | 6 | 5 |
| 2003 | 5393 | 2990 | 593 | 1214 | 538 | 50 | 6 | 2 |
| 2004 | 5108 | 2902 | 504 | 1103 | 555 | 30 | 9 | 5 |
| 2005 | 5259 | 3062 | 436 | 1121 | 567 | 55 | 8 | 10 |
| 2006 | 5712 | 3466 | 361 | 1169 | 646 | 55 | 7 | 8 |
| 2007 | 6948 | 3935 | 855 | 1247 | 807 | 88 | 6 | 10 |
| 2008 | 6561 | 3897 | 738 | 1082 | 741 | 88 | 8 | 7 |
| 2009 | 6168 | 3821 | 327 | 1103 | 805 | 88 | 14 | 10 |

ПРИЛОГ 2

Резултати мерења реализованих за потребе симулације лошег електричног контакта насталог услед непотпуног налегања бакарног проводника и контактне површине елемента електроинсталационе компоненте (смањења ефективне површине контакта)

Коментар: * тренутак успостављања (почетка горења) редног електричног лука
** тренутак када се редни електрични лук угасио

Табела 1. Резултати мерења за комбинацију електрода бакар–бакар и површину преклапања од 100% (површина попречног пресека: 1,5 mm²)

| | | | | | | | |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|
| <i>t</i> (min.) | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| <i>I</i> (A) | 8,0 | 7,9 | 7,9 | 7,9 | 7,9 | 7,9 | 7,9 |
| <i>U</i> (V) | 0,0242 | 0,0621 | 0,0702 | 0,157 | 0,166 | 0,240 | 0,269 |
| <i>R</i> (Ω) | 0,003 | 0,008 | 0,009 | 0,020 | 0,021 | 0,030 | 0,034 |
| <i>T</i> (°C) | 24 | 26 | 31 | 33 | 34 | 35 | 36 |
| <i>t</i> (min.) | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| <i>I</i> (A) | 10,1 | 10,0 | 10,0 | 10,0 | 10,0 | 10,0 | 10,0 |
| <i>U</i> (V) | 0,0197 | 0,0581 | 0,0692 | 0,0725 | 0,179 | 0,257 | 0,320 |
| <i>R</i> (Ω) | 0,002 | 0,006 | 0,007 | 0,007 | 0,018 | 0,026 | 0,032 |
| <i>T</i> (°C) | 24 | 34 | 34 | 35 | 35 | 35 | 41 |

Табела 2. Резултати мерења за комбинацију електрода бакар–бакар и површину преклапања од 50% (површина попречног пресека: 1,5 mm²)

| | | | | | | | |
|-----------------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|
| <i>t</i> (min.) | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| <i>I</i> (A) | 8,1 | 8,1 | 8,0 | 7,9 | 7,9 | 7,9 | 7,9 |
| <i>U</i> (V) | 0,0249 | 0,0285 | 0,0788 | 0,125 | 0,170 | 0,195 | 0,215 |
| <i>R</i> (Ω) | 0,003 | 0,004 | 0,010 | 0,016 | 0,022 | 0,025 | 0,027 |
| <i>T</i> (°C) | 25 | 32 | 34 | 35 | 37 | 39 | 41 |
| <i>t</i> (min.) | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| <i>I</i> (A) | 10,1 | 10,1 | 10,0 | 10,0 | 10,0 | 10,0 | 10,0 |
| <i>U</i> (V) | 0,021 | 0,0352 | 0,0668 | 0,103 | 0,147 | 0,187 | 0,324 |
| <i>R</i> (Ω) | 0,002 | 0,003 | 0,007 | 0,010 | 0,015 | 0,019 | 0,032 |
| <i>T</i> (°C) | 24 | 35 | 37 | 38 | 38 | 39 | 40 |

Табела 3. Резултати мерења за комбинацију електрода бакар–бакар и површину преклапања од 15% (површина попречног пресека: 1,5 mm²)

| | | | | | | | |
|-----------------|--------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|
| <i>t</i> (min.) | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| <i>I</i> (A) | 8,2 | 8,2 | 8,1 | 8,1 | 8,1 | 8,1 | 8,1 |
| <i>U</i> (V) | 0,0199 | 0,0592 | 0,107 | 0,1512 | 0,165 | 0,195 | 0,304 |
| <i>R</i> (Ω) | 0,002 | 0,007 | 0,013 | 0,019 | 0,020 | 0,024 | 0,038 |
| <i>T</i> (°C) | 22 | 30 | 32 | 33 | 34 | 35 | 35 |
| <i>t</i> (min.) | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| <i>I</i> (A) | 10,1 | 10,1 | 10,1 | 10,1 | 10,1 | 10,1 | 10,0 |
| <i>U</i> (V) | 0,0233 | 0,075 | 0,115 | 0,172 | 0,198 | 0,225 | 0,285 |
| <i>R</i> (Ω) | 0,002 | 0,007 | 0,011 | 0,017 | 0,020 | 0,022 | 0,029 |
| <i>T</i> (°C) | 25 | 31 | 37 | 45 | 56 | 66 | 77 |

Табела 4. Резултати мерења за комбинацију електрода бакар–бакар и површину преклапања од 100% (површина попречног пресека: 2,5 mm²)

| | | | | | | | |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| t (min.) | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| I (A) | 10,1 | 10,1 | 10,1 | 10,1 | 10,1 | 10,1 | 10,1 |
| U (V) | 0,1029 | 0,1332 | 0,1473 | 0,2376 | 0,495 | 0,556 | 0,568 |
| R (Ω) | 0,010 | 0,013 | 0,015 | 0,024 | 0,049 | 0,055 | 0,056 |
| T (°C) | 26 | 33 | 34 | 34 | 34 | 35 | 36 |
| t (min.) | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| I (A) | 13,0 | 13,0 | 13,0 | 12,9 | 12,9 | 12,9 | 12,9 |
| U (V) | 0,060 | 0,0737 | 0,1426 | 0,1586 | 0,2317 | 0,4961 | 0,5279 |
| R (Ω) | 0,005 | 0,006 | 0,011 | 0,012 | 0,018 | 0,038 | 0,041 |
| T (°C) | 26 | 33 | 34 | 34 | 35 | 36 | 37 |
| t (min.) | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| I (A) | 16,2 | 16,2 | 16,2 | 16,2 | 16,2 | 16,2 | 16,2 |
| U (V) | 0,0628 | 0,1246 | 0,1608 | 0,212 | 0,2652 | 0,376 | 0,47 |
| R (Ω) | 0,004 | 0,008 | 0,010 | 0,013 | 0,016 | 0,023 | 0,029 |
| T (°C) | 26 | 34 | 36 | 36 | 38 | 38 | 40 |

Табела 5. Резултати мерења за комбинацију електрода бакар–бакар и површину преклапања од 50% (површина попречног пресека: 2,5 mm²)

| | | | | | | | |
|-----------------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|
| t (min.) | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| I (A) | 10,1 | 10,1 | 10,1 | 10,1 | 10,1 | 10,1 | 10,1 |
| U (V) | 0,0333 | 0,173 | 0,3312 | 0,412 | 0,573 | 0,616 | 0,636 |
| R (Ω) | 0,003 | 0,017 | 0,033 | 0,041 | 0,057 | 0,061 | 0,063 |
| T (°C) | 26 | 35 | 37 | 39 | 41 | 44 | 46 |
| t (min.) | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| I (A) | 13,1 | 13,1 | 13,1 | 13,1 | 13,1 | 13,1 | 13,1 |
| U (V) | 0,0542 | 0,175 | 0,486 | 0,521 | 0,608 | 0,657 | 0,699 |
| R (Ω) | 0,004 | 0,013 | 0,037 | 0,040 | 0,046 | 0,050 | 0,053 |
| T (°C) | 26 | 36 | 41 | 49 | 57 | 63 | 67 |
| t (min.) | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| I (A) | 16,0 | 16,0 | 16,0 | 16,0 | 15,9 | 15,9 | 15,9 |
| U (V) | 0,062 | 0,1335 | 0,226 | 0,491 | 0,525 | 0,677 | 0,732 |
| R (Ω) | 0,004 | 0,008 | 0,014 | 0,031 | 0,033 | 0,043 | 0,046 |
| T (°C) | 27 | 40 | 43 | 50 | 59 | 65 | 69 |

Табела 6. Резултати мерења за комбинацију електрода бакар–бакар и површину преклапања од 15% (површина попречног пресека: 2,5 mm²)

| | | | | | | | |
|-----------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| t (min.) | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| I (A) | 10,0 | 9,9 | 9,9 | 9,9 | 9,9 | 9,9 | 9,9 |
| U (V) | 0,0278 | 0,144 | 0,442 | 0,552 | 0,621 | 0,678 | 0,718 |
| R (Ω) | 0,003 | 0,015 | 0,045 | 0,056 | 0,063 | 0,068 | 0,073 |
| T (°C) | 27 | 34 | 36 | 51 | 65 | 70 | 73 |
| t (min.) | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| I (A) | 13,1 | 13,1 | 13,1 | 13,1 | 13,1 | 13,1 | 13,1 |
| U (V) | 0,0387 | 0,306 | 0,365 | 0,496 | 0,574 | 0,806 | 0,838 |
| R (Ω) | 0,003 | 0,023 | 0,028 | 0,038 | 0,044 | 0,062 | 0,064 |
| T (°C) | 27 | 53 | 54 | 58 | 66 | 72 | 77 |
| t (min.) | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| I (A) | 16,0 | 16,0 | 16,0 | 16,0 | 16,0 | 16,0 | 16,0 |
| U (V) | 0,0582 | 0,120 | 0,289 | 0,335 | 0,446 | 0,698 | 0,860 |
| R (Ω) | 0,004 | 0,008 | 0,018 | 0,021 | 0,028 | 0,044 | 0,054 |
| T (°C) | 24 | 33 | 43 | 58 | 61 | 70 | 78 |

Табела 7. Резултати мерења за комбинацију електрода бакар–бакар и површину преклапања од 100% (површина попречног пресека: 4 mm²)

| | | | | | | | |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|
| <i>t</i> (min.) | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| <i>I</i> (A) | 16,1 | 16,1 | 16,1 | 16,0 | 15,9 | 16,0 | 16,0 |
| <i>U</i> (V) | 0,0184 | 0,078 | 0,1107 | 0,1614 | 0,206 | 0,213 | 0,246 |
| <i>R</i> (Ω) | 0,001 | 0,005 | 0,007 | 0,010 | 0,013 | 0,013 | 0,015 |
| <i>T</i> (°C) | 29 | 36 | 36 | 37 | 37 | 37 | 38 |
| <i>t</i> (min.) | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| <i>I</i> (A) | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 |
| <i>U</i> (V) | 0,0329 | 0,113 | 0,159 | 0,203 | 0,229 | 0,271 | 0,289 |
| <i>R</i> (Ω) | 0,002 | 0,006 | 0,008 | 0,010 | 0,011 | 0,014 | 0,014 |
| <i>T</i> (°C) | 29 | 37 | 37 | 37 | 38 | 38 | 38 |
| <i>t</i> (min.) | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| <i>I</i> (A) | 25,0 | 24,9 | 24,9 | 24,9 | 24,9 | 24,9 | 24,9 |
| <i>U</i> (V) | 0,0728 | 0,1316 | 0,225 | 0,235 | 0,262 | 0,271 | 0,298 |
| <i>R</i> (Ω) | 0,003 | 0,005 | 0,009 | 0,009 | 0,011 | 0,011 | 0,012 |
| <i>T</i> (°C) | 29 | 41 | 43 | 43 | 44 | 44 | 44 |

Табела 8. Резултати мерења за комбинацију електрода бакар–бакар и површину преклапања од 50% (површина попречног пресека: 4 mm²)

| | | | | | | | |
|-----------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <i>t</i> (min.) | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| <i>I</i> (A) | 16,2 | 16,2 | 16,2 | 16,2 | 16,2 | 16,1 | 16,1 |
| <i>U</i> (V) | 0,0378 | 0,101 | 0,154 | 0,176 | 0,246 | 0,288 | 0,305 |
| <i>R</i> (Ω) | 0,002 | 0,006 | 0,010 | 0,011 | 0,015 | 0,018 | 0,019 |
| <i>T</i> (°C) | 29 | 36 | 37 | 41 | 42 | 42 | 42 |
| <i>t</i> (min.) | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| <i>I</i> (A) | 20,1 | 20,1 | 20,1 | 20,1 | 20,1 | 20,1 | 20,1 |
| <i>U</i> (V) | 0,061 | 0,122 | 0,189 | 0,207 | 0,180 | 0,208 | 0,215 |
| <i>R</i> (Ω) | 0,003 | 0,006 | 0,009 | 0,010 | 0,009 | 0,010 | 0,011 |
| <i>T</i> (°C) | 29 | 41 | 44 | 44 | 42 | 42 | 43 |
| <i>t</i> (min.) | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| <i>I</i> (A) | 25,1 | 25,1 | 25,1 | 25,1 | 25,1 | 25,1 | 25,1 |
| <i>U</i> (V) | 0,108 | 0,126 | 0,174 | 0,225 | 0,231 | 0,245 | 0,271 |
| <i>R</i> (Ω) | 0,004 | 0,005 | 0,007 | 0,009 | 0,009 | 0,010 | 0,011 |
| <i>T</i> (°C) | 28 | 39 | 40 | 41 | 43 | 43 | 44 |

Табела 9. Резултати мерења за комбинацију електрода бакар–бакар и површину преклапања од 15% (површина попречног пресека: 4 mm²)

| | | | | | | | |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|
| <i>t</i> (min.) | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| <i>I</i> (A) | 16,0 | 16,0 | 16,0 | 16,0 | 16,0 | 15,9 | 15,9 |
| <i>U</i> (V) | 0,0173 | 0,0247 | 0,0394 | 0,158 | 0,185 | 0,175 | 0,179 |
| <i>R</i> (Ω) | 0,001 | 0,002 | 0,002 | 0,010 | 0,012 | 0,011 | 0,011 |
| <i>T</i> (°C) | 28 | 33 | 35 | 36 | 37 | 38 | 40 |
| <i>t</i> (min.) | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| <i>I</i> (A) | 20,1 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 |
| <i>U</i> (V) | 0,024 | 0,073 | 0,097 | 0,127 | 0,128 | 0,133 | 0,178 |
| <i>R</i> (Ω) | 0,001 | 0,004 | 0,005 | 0,006 | 0,006 | 0,007 | 0,009 |
| <i>T</i> (°C) | 28 | 42 | 42 | 42 | 43 | 43 | 45 |
| <i>t</i> (min.) | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| <i>I</i> (A) | 25,1 | 25,0 | 25,0 | 25,0 | 25,0 | 25,0 | 25,0 |
| <i>U</i> (V) | 0,0354 | 0,0656 | 0,0753 | 0,0945 | 0,127 | 0,138 | 0,181 |
| <i>R</i> (Ω) | 0,001 | 0,003 | 0,003 | 0,004 | 0,005 | 0,006 | 0,007 |
| <i>T</i> (°C) | 28 | 44 | 48 | 48 | 49 | 49 | 50 |

Табела 10. Резултати мерења за комбинацију електрода бакар–месинг и површину преклапања од 100% (површина попречног пресека: 1,5 mm²)

| | | | | | | | |
|------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <i>t</i> (min.) | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| <i>I</i> (A) | 8,1 | 8,1 | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 8,0 |
| <i>U</i> (V) | 0,141 | 0,495 | 0,635 | 0,726 | 0,757 | 0,820 | 0,960 |
| <i>R</i> (Ω) | 0,017 | 0,061 | 0,079 | 0,091 | 0,095 | 0,103 | 0,120 |
| <i>T</i> (°C) | 25 | 40 | 57 | 64 | 66 | 70 | 72 |
| <i>t</i> (min.) | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| <i>I</i> (A) | 10,1 | 10,1 | 10,1 | 10,0 | 10,0 | 10,0 | 10,0 |
| <i>U</i> (V) | 0,0547 | 0,0969 | 0,582 | 0,792 | 0,944 | 1,020 | 1,176 |
| <i>R</i> (Ω) | 0,005 | 0,010 | 0,058 | 0,079 | 0,094 | 0,102 | 0,118 |
| <i>T</i> (°C) | 25 | 35 | 44 | 60 | 63 | 66 | 71 |

Табела 11. Резултати мерења за комбинацију електрода бакар–месинг и површину преклапања од 50% (површина попречног пресека: 1,5 mm²)

| | | | | | |
|------------------------|--------|--------|-------|-------|----|
| <i>t</i> (min.) | 0 | 10 | 20 | 25 | 29 |
| <i>I</i> (A) | 8,2 | 8,2 | 8,1 | 7,9 * | ** |
| <i>U</i> (V) | 0,0794 | 0,576 | 1,345 | 24,6 | / |
| <i>R</i> (Ω) | 0,010 | 0,070 | 0,166 | 3,114 | / |
| <i>T</i> (°C) | 25 | 57 | 63 | >385 | / |
| <i>t</i> (min.) | 0 | 10 | 20 | 21 | 23 |
| <i>I</i> (A) | 10,0 | 9,9 | 9,9 | 9,8 * | ** |
| <i>U</i> (V) | 0,0451 | 0,0967 | 0,626 | 27,1 | / |
| <i>R</i> (Ω) | 0,005 | 0,010 | 0,063 | 2,765 | / |
| <i>T</i> (°C) | 26 | 40 | 86 | >385 | / |

Табела 12. Резултати мерења за комбинацију електрода бакар–месинг и површину преклапања од 15% (површина попречног пресека: 1,5 mm²)

| | | | | |
|------------------------|--------|--------|-------|----|
| <i>t</i> (min.) | 0 | 10 | 18 | 19 |
| <i>I</i> (A) | 8,2 | 8,2 | 8,1 * | ** |
| <i>U</i> (V) | 0,0197 | 0,1812 | 28 | / |
| <i>R</i> (Ω) | 0,002 | 0,022 | 3,457 | / |
| <i>T</i> (°C) | 26 | 165 | >385 | / |
| <i>t</i> (min.) | 0 | 4 | 5 | / |
| <i>I</i> (A) | 10,2 | 10* | ** | / |
| <i>U</i> (V) | 0,0264 | 32,5 | / | / |
| <i>R</i> (Ω) | 0,003 | 3,250 | / | / |
| <i>T</i> (°C) | 26 | >385 | / | / |

Табела 13. Резултати мерења за комбинацију електрода бакар–месинг и површину преклапања од 100% (површина попречног пресека: 2,5 mm²)

| | | | | | | | |
|-----------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| t (min.) | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| I (A) | 10,0 | 10,0 | 10,0 | 10,0 | 9,9 | 9,9 | 9,9 |
| U (V) | 0,0284 | 0,114 | 0,399 | 0,442 | 0,526 | 0,548 | 0,569 |
| R (Ω) | 0,003 | 0,011 | 0,040 | 0,044 | 0,053 | 0,055 | 0,057 |
| T (°C) | 28 | 33 | 38 | 43 | 49 | 51 | 52 |
| t (min.) | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| I (A) | 13,2 | 13,2 | 13,1 | 13,1 | 13,0 | 12,9 | 12,9 |
| U (V) | 0,0816 | 0,135 | 0,570 | 0,731 | 0,783 | 0,825 | 0,948 |
| R (Ω) | 0,006 | 0,010 | 0,044 | 0,056 | 0,060 | 0,064 | 0,073 |
| T (°C) | 28 | 44 | 61 | 66 | 67 | 68 | 69 |
| t (min.) | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| I (A) | 16 | 15,9 | 15,8 | 15,8 | 15,8 | 15,8 | 15,8 |
| U (V) | 0,0938 | 0,421 | 0,559 | 0,870 | 0,915 | 1,050 | 1,160 |
| R (Ω) | 0,006 | 0,026 | 0,035 | 0,055 | 0,058 | 0,066 | 0,073 |
| T (°C) | 28 | 38 | 57 | 65 | 69 | 71 | 73 |

Табела 14. Резултати мерења за комбинацију електрода бакар–месинг и површину преклапања од 50% (површина попречног пресека: 2,5 mm²)

| | | | | | | |
|-----------------|--------|-------|-------|-------|-------|----|
| t (min.) | 0 | 10 | 20 | 30 | 35 | 38 |
| I (A) | 10,0 | 10,0 | 10,0 | 9,9 | 9,6* | ** |
| U (V) | 0,0599 | 0,343 | 0,936 | 1,005 | 25,2 | / |
| R (Ω) | 0,006 | 0,034 | 0,094 | 0,102 | 2,625 | / |
| T (°C) | 26 | 36 | 47 | 52 | >385 | / |
| t (min.) | 0 | 10 | 17 | 19 | / | / |
| I (A) | 13 | 12,9 | 12,7* | ** | / | / |
| U (V) | 0,072 | 0,528 | 35,2 | / | / | / |
| R (Ω) | 0,006 | 0,041 | 2,772 | / | / | / |
| T (°C) | 30 | 58 | >385 | / | / | / |
| t (min.) | 0 | 10 | 13 | 14 | / | / |
| I (A) | 16 | 15,8 | 15,7* | ** | / | / |
| U (V) | 0,0778 | 1,934 | 46,9 | / | / | / |
| R (Ω) | 0,005 | 0,122 | 2,987 | / | / | / |
| T (°C) | 28 | 90 | >385 | / | / | / |

Табела 15. Резултати мерења за комбинацију електрода бакар–месинг и површину преклапања од 15% (површина попречног пресека: 2,5 mm²)

| | | | | |
|-----------------|--------|-------|-------|----|
| t (min.) | 0 | 10 | 12 | 14 |
| I (A) | 10,0 | 9,9 | 9,7 * | ** |
| U (V) | 0,0231 | 1,029 | 70,5 | / |
| R (Ω) | 0,002 | 0,104 | 7,268 | / |
| T (°C) | 28 | 70 | >385 | / |
| t (min.) | 0 | 8 | 9 | / |
| I (A) | 13,1 | 13,0* | ** | / |
| U (V) | 0,0936 | 96 | / | / |
| R (Ω) | 0,007 | 7,385 | / | / |
| T (°C) | 28 | >385 | / | / |
| t (min.) | 0 | 5 | 6 | / |
| I (A) | 16 | 15,8* | ** | / |
| U (V) | 0,1342 | 98,8 | / | / |
| R (Ω) | 0,008 | 6,253 | / | / |
| T (°C) | 28 | >385 | / | / |

Табела 16. Резултати мерења за комбинацију електрода бакар–месинг и површину преклапања од 100% (површина попречног пресека: 4 mm²)

| | | | | | | | |
|-----------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| t (min.) | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| I (A) | 16 | 15,9 | 15,8 | 15,8 | 15,8 | 15,8 | 15,8 |
| U (V) | 0,0255 | 0,159 | 0,502 | 0,682 | 1,496 | 2,096 | 2,29 |
| R (Ω) | 0,002 | 0,010 | 0,032 | 0,043 | 0,095 | 0,133 | 0,145 |
| T (°C) | 29 | 38 | 50 | 58 | 62 | 65 | 70 |
| t (min.) | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| I (A) | 20,1 | 20,1 | 20,1 | 20,1 | 20,0 | 20,0 | 20,0 |
| U (V) | 0,085 | 0,142 | 0,121 | 1,355 | 1,659 | 1,81 | 2,751 |
| R (Ω) | 0,004 | 0,007 | 0,006 | 0,067 | 0,083 | 0,091 | 0,138 |
| T (°C) | 28 | 39 | 44 | 48 | 59 | 66 | 73 |
| t (min.) | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| I (A) | 25,2 | 25,1 | 25,1 | 25,0 | 25,0 | 25,0 | 25,0 |
| U (V) | 0,0669 | 0,170 | 0,608 | 1,454 | 1,841 | 1,912 | 1,957 |
| R (Ω) | 0,003 | 0,007 | 0,024 | 0,058 | 0,074 | 0,076 | 0,078 |
| T (°C) | 29 | 43 | 58 | 66 | 68 | 71 | 74 |

Табела 17. Резултати мерења за комбинацију електрода бакар–месинг и површину преклапања од 50% (површина попречног пресека: 4 mm²)

| | | | | | | | |
|-----------------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|----|
| t (min.) | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 43 | 46 |
| I (A) | 16,1 | 15,9 | 15,8 | 15,8 | 15,8 | 15,8* | ** |
| U (V) | 0,0207 | 0,1204 | 0,2378 | 0,684 | 0,749 | 38,4 | / |
| R (Ω) | 0,001 | 0,008 | 0,015 | 0,043 | 0,047 | 2,43 | / |
| T (°C) | 28 | 37 | 56 | 80 | 82 | >385 | / |
| t (min.) | 0 | 10 | 20 | 30 | 35 | 37 | / |
| I (A) | 20,1 | 20,1 | 20,1 | 20,1 | 20,0* | ** | / |
| U (V) | 0,0218 | 0,55 | 0,681 | 0,761 | 56,8 | / | / |
| R (Ω) | 0,001 | 0,027 | 0,034 | 0,038 | 2,84 | / | / |
| T (°C) | 28 | 52 | 78 | 96 | >385 | / | / |
| t (min.) | 0 | 10 | 20 | 27 | 29 | / | / |
| I (A) | 25,1 | 25,0 | 25,0 | 24,9* | ** | / | / |
| U (V) | 0,0303 | 0,512 | 0,765 | 71,8 | / | / | / |
| R (Ω) | 0,001 | 0,020 | 0,031 | 2,884 | / | / | / |
| T (°C) | 30 | 59 | 79 | >385 | / | / | / |

Табела 18. Резултати мерења за комбинацију електрода бакар–месинг и површину преклапања од 15% (површина попречног пресека: 4 mm²)

| | | | | | |
|-----------------|--------|-------|-------|-------|----|
| t (min.) | 0 | 10 | 20 | 27 | 29 |
| I (A) | 16,2 | 16,1 | 16,1 | 15,9* | ** |
| U (V) | 0,0154 | 0,722 | 1,185 | 17,34 | / |
| R (Ω) | 0,001 | 0,045 | 0,074 | 1,091 | / |
| T (°C) | 29 | 48 | 114 | >385 | / |
| t (min.) | 0 | 10 | 20 | 23 | 25 |
| I (A) | 20,1 | 20,0 | 19,9 | 19,9* | ** |
| U (V) | 0,0185 | 0,113 | 0,713 | 38,5 | / |
| R (Ω) | 0,001 | 0,006 | 0,036 | 1,935 | / |
| T (°C) | 30 | 58 | 159 | >385 | / |
| t (min.) | 0 | 10 | 17 | 19 | / |
| I (A) | 25,0 | 25,0 | 24,7* | ** | / |
| U (V) | 0,0293 | 0,171 | 67,5 | / | / |
| R (Ω) | 0,001 | 0,007 | 2,733 | / | / |
| T (°C) | 31 | 66 | >385 | / | / |

Табела 19. Резултати мерења за комбинацију електрода бакар–нерђајући челик и површину преклапања од 100%, (површина попречног пресека: 1,5 mm²)

| | | | | | | | |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| t (min.) | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| I (A) | 8 | 8,0 | 7,9 | 7,9 | 7,9 | 7,9 | 7,9 |
| U (V) | 0,337 | 1,161 | 1,485 | 2,269 | 2,715 | 3,120 | 3,350 |
| R (Ω) | 0,042 | 0,145 | 0,188 | 0,287 | 0,344 | 0,395 | 0,424 |
| T (°C) | 27 | 108 | 170 | 212 | 238 | 274 | 315 |
| t (min.) | 0 | 10 | 20 | 27 | 29 | / | / |
| I (A) | 10,2 | 10,2 | 10,2 | 10,2* | ** | / | / |
| U (V) | 0,252 | 1,222 | 1,623 | 2,605 | / | / | / |
| R (Ω) | 0,025 | 0,120 | 0,159 | 0,255 | / | / | / |
| T (°C) | 28 | 169 | 192 | >385 | / | / | / |

Табела 20. Резултати мерења за комбинацију електрода бакар–нерђајући челик и површину преклапања од 50% (површина попречног пресека: 1,5 mm²)

| | | | | | |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|----|
| t (min.) | 0 | 10 | 20 | 28 | 29 |
| I (A) | 8 | 8 | 8 | 7,9* | ** |
| U (V) | 0,307 | 1,195 | 1,477 | 2,45 | / |
| R (Ω) | 0,038 | 0,149 | 0,185 | 0,310 | / |
| T (°C) | 28 | 148 | 176 | >385 | / |
| t (min.) | 0 | 10 | 20 | 23 | 24 |
| I (A) | 10,1 | 10,0 | 10,0 | 10,0* | ** |
| U (V) | 0,295 | 1,123 | 1,649 | 2,230 | / |
| R (Ω) | 0,029 | 0,112 | 0,165 | 0,223 | / |
| T (°C) | 28 | 172 | 216 | >385 | / |

Табела 21. Резултати мерења за комбинацију електрода бакар–нерђајући челик и површину преклапања од 15% (површина попречног пресека: 1,5 mm²)

| | | | | |
|-----------------|-------|-------|-------|----|
| t (min.) | 0 | 10 | 17 | 19 |
| I (A) | 8 | 8 | 7,9* | ** |
| U (V) | 0,37 | 0,93 | 1,992 | / |
| R (Ω) | 0,046 | 0,116 | 0,252 | / |
| T (°C) | 29 | 190 | >385 | / |
| t (min.) | 0 | 10 | 13 | 14 |
| I (A) | 10 | 10 | 9,9* | ** |
| U (V) | 0,246 | 1,381 | 2,25 | / |
| R (Ω) | 0,025 | 0,138 | 0,227 | / |
| T (°C) | 30 | 198 | >385 | / |

Табела 22. Резултати мерења за комбинацију електрода бакар–нерђајући челик и површину преклапања од 100% (површина попречног пресека: 2,5 mm²)

| | | | | | | | |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <i>t</i> (min.) | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| <i>I</i> (A) | 10,1 | 10,1 | 10,1 | 10,1 | 10,1 | 10,1 | 10,1 |
| <i>U</i> (V) | 1,26 | 1,707 | 1,750 | 2,25 | 2,35 | 2,39 | 2,42 |
| <i>R</i> (Ω) | 0,125 | 0,169 | 0,173 | 0,223 | 0,233 | 0,237 | 0,240 |
| <i>T</i> (°C) | 28 | 115 | 134 | 201 | 223 | 241 | 265 |
| <i>t</i> (min.) | 0 | 10 | 20 | 24 | 26 | / | / |
| <i>I</i> (A) | 13,2 | 13,1 | 13,0 | 13,0* | ** | / | / |
| <i>U</i> (V) | 1,255 | 2,264 | 2,375 | 2,425 | / | / | / |
| <i>R</i> (Ω) | 0,095 | 0,173 | 0,183 | 0,187 | / | / | / |
| <i>T</i> (°C) | 28 | 294 | 363 | >385 | / | / | / |
| <i>t</i> (min.) | 0 | 10 | 17 | 19 | / | / | / |
| <i>I</i> (A) | 16,1 | 16,0 | 15,9* | ** | / | / | / |
| <i>U</i> (V) | 1,276 | 2,47 | 2,68 | / | / | / | / |
| <i>R</i> (Ω) | 0,079 | 0,154 | 0,169 | / | / | / | / |
| <i>T</i> (°C) | 27 | 315 | >385 | / | / | / | / |

Табела 23. Резултати мерења за комбинацију електрода бакар–нерђајући челик и површину преклапања од 50% (површина попречног пресека: 2,5 mm²)

| | | | | | |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|----|
| <i>t</i> (min.) | 0 | 10 | 20 | 24 | 27 |
| <i>I</i> (A) | 10,2 | 10,2 | 10,2 | 10,2* | ** |
| <i>U</i> (V) | 1,39 | 2,55 | 3,063 | 3,23 | / |
| <i>R</i> (Ω) | 0,136 | 0,250 | 0,300 | 0,317 | / |
| <i>T</i> (°C) | 27 | 169 | 313 | >385 | / |
| <i>t</i> (min.) | 0 | 10 | 16 | 19 | / |
| <i>I</i> (A) | 13,2 | 13,1 | 13,1* | ** | / |
| <i>U</i> (V) | 1,275 | 2,315 | 2,54 | / | / |
| <i>R</i> (Ω) | 0,097 | 0,177 | 0,194 | / | / |
| <i>T</i> (°C) | 27 | 261 | >385 | / | / |
| <i>t</i> (min.) | 0 | 10 | 12 | 16 | / |
| <i>I</i> (A) | 16,0 | 16,0 | 15,9* | ** | / |
| <i>U</i> (V) | 2,17 | 2,35 | 2,43 | / | / |
| <i>R</i> (Ω) | 0,136 | 0,147 | 0,153 | / | / |
| <i>T</i> (°C) | 27 | 348 | >385 | / | / |

Табела 24. Резултати мерења за комбинацију електроде бакар–нерђајући челик и површину преклапања од 15% (површина попречног пресека: 2,5 mm²)

| | | | | | |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|----|
| <i>t</i> (min.) | 0 | 10 | 20 | 24 | 28 |
| <i>I</i> (A) | 10,0 | 10,0 | 9,9 | 9,9* | ** |
| <i>U</i> (V) | 1,23 | 2,28 | 2,85 | 3,203 | / |
| <i>R</i> (Ω) | 0,123 | 0,228 | 0,288 | 0,324 | / |
| <i>T</i> (°C) | 27 | 227 | 340 | >385 | / |
| <i>t</i> (min.) | 0 | 7 | 9 | / | / |
| <i>I</i> (A) | 13,2 | 13,1* | ** | / | / |
| <i>U</i> (V) | 1,42 | 2,32 | / | / | / |
| <i>R</i> (Ω) | 0,108 | 0,177 | / | / | / |
| <i>T</i> (°C) | 27 | >385 | / | / | / |
| <i>t</i> (min.) | 0 | 5 | 8 | / | / |
| <i>I</i> (A) | 16,1 | 15,9* | ** | / | / |
| <i>U</i> (V) | 1,26 | 2,376 | / | / | / |
| <i>R</i> (Ω) | 0,078 | 0,149 | / | / | / |
| <i>T</i> (°C) | 27 | >385 | / | / | / |

Табела 25. Резултати мерења за комбинацију електрода бакар–нерђајући челик и површину преклапања од 100% (површина попречног пресека: 4 mm²)

| | | | | | | | |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <i>t</i> (min.) | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| <i>I</i> (A) | 16,1 | 16,0 | 16,0 | 16,0 | 16,0 | 16,0 | 16,0 |
| <i>U</i> (V) | 0,335 | 1,018 | 1,154 | 1,570 | 1,588 | 1,639 | 2,183 |
| <i>R</i> (Ω) | 0,021 | 0,064 | 0,072 | 0,098 | 0,099 | 0,102 | 0,136 |
| <i>T</i> (°C) | 29 | 122 | 150 | 205 | 215 | 235 | 292 |
| <i>t</i> (min.) | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 44 | 48 |
| <i>I</i> (A) | 20,0 | 20,0 | 19,9 | 19,8 | 19,8 | 19,7* | ** |
| <i>U</i> (V) | 0,25 | 0,711 | 0,954 | 1,225 | 2,350 | 2,510 | / |
| <i>R</i> (Ω) | 0,013 | 0,036 | 0,048 | 0,062 | 0,119 | 0,127 | / |
| <i>T</i> (°C) | 28 | 86 | 112 | 163 | 330 | >385 | / |
| <i>t</i> (min.) | 0 | 10 | 20 | 30 | 36 | 39 | / |
| <i>I</i> (A) | 25,1 | 25,0 | 25,0 | 25,0 | 25,0* | ** | / |
| <i>U</i> (V) | 0,24 | 0,931 | 1,689 | 2,085 | 2,355 | / | / |
| <i>R</i> (Ω) | 0,010 | 0,037 | 0,068 | 0,083 | 0,094 | / | / |
| <i>T</i> (°C) | 29 | 124 | 252 | 294 | >385 | / | / |

Табела 26. Резултати мерења за комбинацију електрода бакар–нерђајући челик и површину преклапања од 50% (површина попречног пресека: 4 mm²)

| | | | | | | | |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----|
| <i>t</i> (min.) | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 42 | 45 |
| <i>I</i> (A) | 16,2 | 16,2 | 15,9 | 15,9 | 15,9 | 15,9* | ** |
| <i>U</i> (V) | 0,331 | 1,151 | 1,605 | 2,047 | 2,391 | 2,427 | / |
| <i>R</i> (Ω) | 0,020 | 0,071 | 0,101 | 0,129 | 0,150 | 0,153 | / |
| <i>T</i> (°C) | 27 | 83 | 176 | 236 | 297 | >385 | / |
| <i>t</i> (min.) | 0 | 10 | 20 | 30 | 31 | 33 | / |
| <i>I</i> (A) | 20,0 | 19,9 | 19,9 | 19,8 | 19,8* | ** | / |
| <i>U</i> (V) | 0,383 | 1,057 | 1,477 | 2,197 | 2,452 | / | / |
| <i>R</i> (Ω) | 0,019 | 0,053 | 0,074 | 0,111 | 0,124 | / | / |
| <i>T</i> (°C) | 29 | 105 | 219 | 295 | >385 | / | / |
| <i>t</i> (min.) | 0 | 10 | 16 | 19 | / | / | / |
| <i>I</i> (A) | 25,1 | 24,9 | 24,8* | ** | / | / | / |
| <i>U</i> (V) | 0,263 | 1,284 | 2,016 | / | / | / | / |
| <i>R</i> (Ω) | 0,010 | 0,052 | 0,081 | / | / | / | / |
| <i>T</i> (°C) | 27 | 139 | >385 | / | / | / | / |

Табела 27. Резултати мерења за комбинацију електрода бакар–нерђајући челик и површину преклапања од 15% (површина попречног пресека: 4 mm²)

| | | | | | | |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|----|
| <i>t</i> (min.) | 0 | 10 | 20 | 30 | 32 | 35 |
| <i>I</i> (A) | 16,1 | 16,0 | 16,0 | 15,9 | 15,9* | ** |
| <i>U</i> (V) | 0,161 | 1,465 | 2,416 | 2,754 | 2,833 | / |
| <i>R</i> (Ω) | 0,010 | 0,092 | 0,151 | 0,173 | 0,178 | / |
| <i>T</i> (°C) | 27 | 133 | 235 | 371 | ≥385 | / |
| <i>t</i> (min.) | 0 | 10 | 16 | 17 | 19 | / |
| <i>I</i> (A) | 20,0 | 19,9 | 19,9 | 19,9* | ** | / |
| <i>U</i> (V) | 0,245 | 1,228 | 2,184 | 2,457 | / | / |
| <i>R</i> (Ω) | 0,012 | 0,062 | 0,110 | 0,123 | / | / |
| <i>T</i> (°C) | 27 | 245 | 319 | >385 | / | / |
| <i>t</i> (min.) | 0 | 10 | 12 | 15 | / | / |
| <i>I</i> (A) | 25,0 | 24,8 | 24,8* | ** | / | / |
| <i>U</i> (V) | 0,314 | 2,350 | 2,517 | / | / | / |
| <i>R</i> (Ω) | 0,013 | 0,095 | 0,101 | / | / | / |
| <i>T</i> (°C) | 28 | 302 | >385 | / | / | / |

ПРИЛОГ 3

Резултати мерења реализованих за потребе анализе ефекта редукције момента затезања завртња на загревање електричних контаката у утикачима и утичницама

А – Прва серија експеримената

Табела 1. Резултати мерења на утикачу (лицнасти проводник (попречни пресек $1,5 \text{ mm}^2$) и јачина струје 8 А)

| <i>Момент затезања = 1 Nm</i> | | | | | | | |
|---------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| <i>t (min.)</i> | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| <i>I (A)</i> | 8,1 | 8,1 | 8,1 | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 8,0 |
| <i>U (mV)</i> | 53 | 64 | 84 | 90 | 83 | 83 | 84 |
| <i>R (mΩ)</i> | 7 | 8 | 10 | 11 | 10 | 10 | 11 |
| <i>T (°C)</i> | 28 | 35 | 38 | 38 | 38 | 38 | 38 |
| <i>Момент затезања = 0,2 Nm</i> | | | | | | | |
| <i>t (min.)</i> | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| <i>I (A)</i> | 8,2 | 8,2 | 8,2 | 8,1 | 8,1 | 8,1 | 8,1 |
| <i>U (mV)</i> | 56 | 58 | 58 | 58 | 57 | 58 | 59 |
| <i>R (mΩ)</i> | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 |
| <i>T (°C)</i> | 28 | 36 | 37 | 38 | 38 | 38 | 38 |
| <i>Момент затезања = 0,1 Nm</i> | | | | | | | |
| <i>t (min.)</i> | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| <i>I (A)</i> | 8,2 | 8,2 | 8,2 | 8,1 | 8,1 | 8,1 | 8,1 |
| <i>U (mV)</i> | 84 | 85 | 86 | 87 | 88 | 88 | 87 |
| <i>R (mΩ)</i> | 10 | 10 | 10 | 11 | 11 | 11 | 11 |
| <i>T (°C)</i> | 28 | 42 | 44 | 44 | 45 | 45 | 45 |

Табела 2. Резултати мерења на утикачу (лицнасти проводник (попречни пресек $1,5 \text{ mm}^2$) и јачина струје 13 А)

| <i>Момент затезања = 1 Nm</i> | | | | | | | |
|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| <i>t (min.)</i> | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| <i>I (A)</i> | 13,1 | 13,0 | 13,0 | 13,0 | 13,0 | 13,0 | 13,0 |
| <i>U (mV)</i> | 79 | 81 | 81 | 81 | 82 | 82 | 83 |
| <i>R (mΩ)</i> | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| <i>T (°C)</i> | 27 | 48 | 49 | 50 | 51 | 52 | 53 |
| <i>Момент затезања = 0,2 Nm</i> | | | | | | | |
| <i>t (min.)</i> | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| <i>I (A)</i> | 13,2 | 13,2 | 13,2 | 13,2 | 13,2 | 13,2 | 13,2 |
| <i>U (mV)</i> | 92 | 96 | 101 | 102 | 103 | 104 | 106 |
| <i>R (mΩ)</i> | 7 | 7 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| <i>T (°C)</i> | 28 | 55 | 55 | 56 | 57 | 57 | 58 |
| <i>Момент затезања = 0,1 Nm</i> | | | | | | | |
| <i>t (min.)</i> | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| <i>I (A)</i> | 13,1 | 13,1 | 13,1 | 13,1 | 13,1 | 13,1 | 13,1 |
| <i>U (mV)</i> | 153 | 157 | 158 | 159 | 161 | 162 | 163 |
| <i>R (mΩ)</i> | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 |
| <i>T (°C)</i> | 27 | 64 | 68 | 69 | 72 | 76 | 78 |

Табела 3. Резултати мерења на утикачу (лицнасти проводник (попречни пресек 1,5 mm²) и јачина струје 16 А)

| <i>Момент затезања = 1 Nm</i> | | | | | | | |
|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| <i>t (min.)</i> | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| <i>I (A)</i> | 16,0 | 16,0 | 16,0 | 15,9 | 15,9 | 15,9 | 15,9 |
| <i>U (mV)</i> | 88 | 93 | 94 | 95 | 99 | 99 | 101 |
| <i>R (mΩ)</i> | 5 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| <i>T (°C)</i> | 27 | 57 | 61 | 62 | 63 | 63 | 63 |
| <i>Момент затезања = 0,2 Nm</i> | | | | | | | |
| <i>t (min.)</i> | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| <i>I (A)</i> | 16,2 | 16,2 | 16,2 | 16,2 | 16,2 | 16,1 | 16,1 |
| <i>U (mV)</i> | 90 | 90 | 92 | 100 | 103 | 113 | 118 |
| <i>R (mΩ)</i> | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 7 | 7 |
| <i>T (°C)</i> | 27 | 59 | 60 | 60 | 61 | 61 | 61 |
| <i>Момент затезања = 0,1 Nm</i> | | | | | | | |
| <i>t (min.)</i> | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| <i>I (A)</i> | 16,2 | 16,2 | 16,2 | 16,2 | 16,2 | 16,2 | 16,2 |
| <i>U (mV)</i> | 92 | 98 | 99 | 100 | 101 | 103 | 105 |
| <i>R (mΩ)</i> | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| <i>T (°C)</i> | 28 | 62 | 62 | 64 | 64 | 64 | 65 |

Табела 4. Резултати мерења на утикачу (лицнасти проводник (попречни пресек 2,5 mm²) и јачина струје 8 А)

| <i>Момент затезања = 1 Nm</i> | | | | | | | |
|---------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| <i>t (min.)</i> | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| <i>I (A)</i> | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 8,0 |
| <i>U (mV)</i> | 27 | 28 | 32 | 32 | 32 | 34 | 34 |
| <i>R (mΩ)</i> | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| <i>T (°C)</i> | 27 | 38 | 38 | 39 | 39 | 39 | 39 |
| <i>Момент затезања = 0,2 Nm</i> | | | | | | | |
| <i>t (min.)</i> | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| <i>I (A)</i> | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 8,0 |
| <i>U (mV)</i> | 35 | 36 | 36 | 36 | 38 | 38 | 38 |
| <i>R (mΩ)</i> | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| <i>T (°C)</i> | 28 | 39 | 40 | 41 | 41 | 42 | 42 |
| <i>Момент затезања = 0,1 Nm</i> | | | | | | | |
| <i>t (min.)</i> | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| <i>I (A)</i> | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 8,0 |
| <i>U (mV)</i> | 42 | 44 | 47 | 47 | 48 | 50 | 51 |
| <i>R (mΩ)</i> | 5 | 5 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| <i>T (°C)</i> | 28 | 42 | 43 | 45 | 46 | 46 | 47 |

Табела 5. Резултати мерења на утикачу (лицнасти проводник (попречни пресек 2,5 mm²) и јачина струје 13 А)

| <i>Момент затезања = 1 Nm</i> | | | | | | | |
|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| <i>t (min.)</i> | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| <i>I (A)</i> | 13,2 | 13,2 | 13,2 | 13,2 | 13,2 | 13,2 | 13,2 |
| <i>U (mV)</i> | 42 | 46 | 46 | 47 | 47 | 47 | 49 |
| <i>R (mΩ)</i> | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| <i>T (°C)</i> | 27 | 46 | 48 | 48 | 48 | 48 | 49 |
| <i>Момент затезања = 0,2 Nm</i> | | | | | | | |
| <i>t (min.)</i> | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| <i>I (A)</i> | 13,2 | 13,2 | 13,2 | 13,2 | 13,2 | 13,2 | 13,2 |
| <i>U (mV)</i> | 43 | 44 | 51 | 52 | 53 | 57 | 60 |
| <i>R (mΩ)</i> | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 |
| <i>T (°C)</i> | 28 | 51 | 53 | 53 | 53 | 53 | 54 |
| <i>Момент затезања = 0,1 Nm</i> | | | | | | | |
| <i>t (min.)</i> | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| <i>I (A)</i> | 13,2 | 13,2 | 13,2 | 13,2 | 13,2 | 13,2 | 13,2 |
| <i>U (mV)</i> | 59 | 86 | 86 | 90 | 90 | 91 | 91 |
| <i>R (mΩ)</i> | 4 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 |
| <i>T (°C)</i> | 29 | 65 | 66 | 66 | 66 | 67 | 67 |

Табела 6. Резултати мерења на утикачу (лицнасти проводник (попречни пресек 2,5 mm²) и јачина струје 16 А)

| <i>Момент затезања = 1 Nm</i> | | | | | | | |
|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| <i>t (min.)</i> | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| <i>I (A)</i> | 16,1 | 16,1 | 16,1 | 16,1 | 16,1 | 16,1 | 16,1 |
| <i>U (mV)</i> | 46 | 49 | 49 | 49 | 51 | 59 | 60 |
| <i>R (mΩ)</i> | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 |
| <i>T (°C)</i> | 28 | 54 | 56 | 56 | 56 | 57 | 58 |
| <i>Момент затезања = 0,2 Nm</i> | | | | | | | |
| <i>t (min.)</i> | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| <i>I (A)</i> | 16,1 | 16,1 | 16,1 | 16,1 | 16,1 | 16,1 | 16,1 |
| <i>U (mV)</i> | 54 | 56 | 57 | 58 | 61 | 63 | 64 |
| <i>R (mΩ)</i> | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| <i>T (°C)</i> | 28 | 57 | 57 | 59 | 60 | 62 | 62 |
| <i>Момент затезања = 0,1 Nm</i> | | | | | | | |
| <i>t (min.)</i> | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| <i>I (A)</i> | 16,1 | 16,1 | 16,1 | 16,1 | 16,1 | 16,1 | 16,1 |
| <i>U (mV)</i> | 55 | 56 | 61 | 68 | 89 | 97 | 112 |
| <i>R (mΩ)</i> | 3 | 3 | 4 | 4 | 6 | 6 | 7 |
| <i>T (°C)</i> | 30 | 63 | 64 | 69 | 78 | 80 | 82 |

Табела 7. Резултати мерења на утичници (пун пресек проводника (попречни пресек 1,5 mm²) и јачина струје 8 А)

| <i>Момент затезања = 1 Nm</i> | | | | | | | |
|---------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| <i>t (min.)</i> | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| <i>I (A)</i> | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 8,0 |
| <i>U (mV)</i> | 42 | 42 | 44 | 44 | 44 | 44 | 45 |
| <i>R (mΩ)</i> | 5 | 5 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| <i>T (°C)</i> | 28 | 35 | 39 | 39 | 40 | 41 | 41 |
| <i>Момент затезања = 0,2 Nm</i> | | | | | | | |
| <i>t (min.)</i> | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| <i>I (A)</i> | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 8,0 |
| <i>U (mV)</i> | 55 | 55 | 55 | 64 | 68 | 68 | 68 |
| <i>R (mΩ)</i> | 7 | 7 | 7 | 8 | 9 | 9 | 9 |
| <i>T (°C)</i> | 29 | 41 | 45 | 46 | 46 | 48 | 48 |
| <i>Момент затезања = 0,1 Nm</i> | | | | | | | |
| <i>t (min.)</i> | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| <i>I (A)</i> | 8,0 | 8,0 | 7,9 | 7,9 | 7,9 | 7,9 | 7,9 |
| <i>U (mV)</i> | 94 | 95 | 96 | 98 | 98 | 99 | 101 |
| <i>R (mΩ)</i> | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 13 | 13 |
| <i>T (°C)</i> | 30 | 46 | 47 | 47 | 47 | 48 | 49 |

Табела 8. Резултати мерења на утичници (пун пресек проводника (попречни пресек 1,5 mm²) и јачина струје 13 А)

| <i>Момент затезања = 1 Nm</i> | | | | | | | |
|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| <i>t (min.)</i> | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| <i>I (A)</i> | 13,0 | 13,0 | 13,0 | 12,9 | 12,9 | 12,9 | 12,9 |
| <i>U (mV)</i> | 71 | 80 | 84 | 84 | 85 | 85 | 86 |
| <i>R (mΩ)</i> | 5 | 6 | 6 | 7 | 7 | 7 | 7 |
| <i>T (°C)</i> | 27 | 42 | 53 | 54 | 54 | 54 | 55 |
| <i>Момент затезања = 0,2 Nm</i> | | | | | | | |
| <i>t (min.)</i> | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| <i>I (A)</i> | 13,1 | 13,1 | 13,1 | 13,1 | 13,1 | 13,1 | 13,1 |
| <i>U (mV)</i> | 78 | 79 | 81 | 83 | 85 | 93 | 95 |
| <i>R (mΩ)</i> | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 7 | 7 |
| <i>T (°C)</i> | 28 | 52 | 54 | 57 | 58 | 61 | 62 |
| <i>Момент затезања = 0,1 Nm</i> | | | | | | | |
| <i>t (min.)</i> | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| <i>I (A)</i> | 13,1 | 13,1 | 13,1 | 13,1 | 13,1 | 13,1 | 13,1 |
| <i>U (mV)</i> | 95 | 101 | 102 | 103 | 105 | 108 | 110 |
| <i>R (mΩ)</i> | 7 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| <i>T (°C)</i> | 28 | 62 | 65 | 66 | 68 | 74 | 77 |

Табела 9. Резултати мерења на утичници (пун пресек проводника (попречни пресек пресек $1,5 \text{ mm}^2$) и јачина струје 16 А)

| <i>Момент затезања = 1 Nm</i> | | | | | | | |
|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| <i>t (min.)</i> | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| <i>I (A)</i> | 16,1 | 16,1 | 16,0 | 16,0 | 16,0 | 16,0 | 16,0 |
| <i>U (mV)</i> | 93 | 102 | 104 | 105 | 125 | 129 | 131 |
| <i>R (mΩ)</i> | 6 | 6 | 7 | 7 | 8 | 8 | 8 |
| <i>T (°C)</i> | 28 | 55 | 67 | 68 | 68 | 69 | 70 |
| <i>Момент затезања = 0,2 Nm</i> | | | | | | | |
| <i>t (min.)</i> | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| <i>I (A)</i> | 16,1 | 16,1 | 16,1 | 16,0 | 16,0 | 16,0 | 16,0 |
| <i>U (mV)</i> | 105 | 107 | 109 | 119 | 130 | 135 | 138 |
| <i>R (mΩ)</i> | 7 | 7 | 7 | 7 | 8 | 8 | 9 |
| <i>T (°C)</i> | 29 | 67 | 70 | 71 | 72 | 72 | 72 |
| <i>Момент затезања = 0,1 Nm</i> | | | | | | | |
| <i>t (min.)</i> | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| <i>I (A)</i> | 16,1 | 16,1 | 16,0 | 16,0 | 16,0 | 16,0 | 16,0 |
| <i>U (mV)</i> | 117 | 122 | 158 | 165 | 168 | 170 | 191 |
| <i>R (mΩ)</i> | 7 | 8 | 10 | 10 | 11 | 11 | 12 |
| <i>T (°C)</i> | 28 | 61 | 77 | 81 | 86 | 87 | 93 |

Табела 10. Резултати мерења на утичници (пун пресек проводника (попречни пресек $2,5 \text{ mm}^2$) и јачина струје 8 А)

| <i>Момент затезања = 1 Nm</i> | | | | | | | |
|---------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| <i>t (min.)</i> | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| <i>I (A)</i> | 8,1 | 8,1 | 8,1 | 8,1 | 8,1 | 8,1 | 8,1 |
| <i>U (mV)</i> | 386 | 409 | 535 | 556 | 577 | 611 | 612 |
| <i>R (mΩ)</i> | 5 | 5 | 7 | 7 | 7 | 8 | 8 |
| <i>T (°C)</i> | 26 | 33 | 34 | 35 | 35 | 36 | 37 |
| <i>Момент затезања = 0,2 Nm</i> | | | | | | | |
| <i>t (min.)</i> | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| <i>I (A)</i> | 8,1 | 8,1 | 8,1 | 8,1 | 8,1 | 8,1 | 8,1 |
| <i>U (mV)</i> | 317 | 416 | 457 | 472 | 515 | 521 | 524 |
| <i>R (mΩ)</i> | 4 | 5 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| <i>T (°C)</i> | 27 | 33 | 34 | 34 | 34 | 34 | 34 |
| <i>Момент затезања = 0,1 Nm</i> | | | | | | | |
| <i>t (min.)</i> | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| <i>I (A)</i> | 8,1 | 8,1 | 8,1 | 8,1 | 8,1 | 8,1 | 8,1 |
| <i>U (mV)</i> | 52 | 61 | 64 | 65 | 067 | 67 | 68 |
| <i>R (mΩ)</i> | 6 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| <i>T (°C)</i> | 27 | 34 | 35 | 35 | 35 | 36 | 36 |

Табела 11. Резултати мерења на утичници (пун пресек проводника (попречни пресек $2,5 \text{ mm}^2$) и јачина струје 13 А)

| <i>Момент затезања = 1 Nm</i> | | | | | | | |
|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| <i>t (min.)</i> | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| <i>I (A)</i> | 13,2 | 13,2 | 13,2 | 13,2 | 13,2 | 13,2 | 13,2 |
| <i>U (mV)</i> | 41 | 45 | 47 | 52 | 58 | 59 | 60 |
| <i>R (mΩ)</i> | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 |
| <i>T (°C)</i> | 26 | 44 | 45 | 46 | 46 | 46 | 47 |
| <i>Момент затезања = 0,2 Nm</i> | | | | | | | |
| <i>t (min.)</i> | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| <i>I (A)</i> | 13,2 | 13,2 | 13,2 | 13,2 | 13,2 | 13,2 | 13,2 |
| <i>U (mV)</i> | 42 | 47 | 55 | 55 | 62 | 62 | 64 |
| <i>R (mΩ)</i> | 3 | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 |
| <i>T (°C)</i> | 25 | 33 | 42 | 44 | 447 | 52 | 52 |
| <i>Момент затезања = 0,1 Nm</i> | | | | | | | |
| <i>t (min.)</i> | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| <i>I (A)</i> | 13,2 | 13,2 | 13,2 | 13,2 | 13,2 | 13,2 | 13,2 |
| <i>U (mV)</i> | 57 | 60 | 61 | 62 | 62 | 63 | 63 |
| <i>R (mΩ)</i> | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| <i>T (°C)</i> | 27 | 49 | 52 | 53 | 54 | 54 | 55 |

Табела 12. Резултати мерења на утичници (пун пресек проводника (попречни пресек 2,5 mm²) и јачина струје 16 А)

| <i>Момент стезања = 1 Nm</i> | | | | | | | |
|--------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| <i>t (min.)</i> | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| <i>I (A)</i> | 16,2 | 16,2 | 16,2 | 16,2 | 16,2 | 16,2 | 16,2 |
| <i>U (mV)</i> | 54 | 55 | 56 | 61 | 61 | 62 | 62 |
| <i>R (mΩ)</i> | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| <i>T (°C)</i> | 27 | 48 | 57 | 60 | 62 | 64 | 64 |
| <i>Момент стезања = 0,2 Nm</i> | | | | | | | |
| <i>t (min.)</i> | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| <i>I (A)</i> | 16,0 | 16,0 | 16,0 | 16,0 | 15,9 | 15,9 | 15,9 |
| <i>U (mV)</i> | 69 | 74 | 75 | 84 | 138 | 139 | 141 |
| <i>R (mΩ)</i> | 4 | 5 | 5 | 5 | 9 | 9 | 9 |
| <i>T (°C)</i> | 28 | 53 | 63 | 64 | 64 | 67 | 70 |
| <i>Момент стезања = 0,1 Nm</i> | | | | | | | |
| <i>t (min.)</i> | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| <i>I (A)</i> | 16,0 | 16,0 | 16,0 | 16,0 | 16,0 | 16,0 | 16,0 |
| <i>U (mV)</i> | 88 | 112 | 132 | 142 | 148 | 167 | 191 |
| <i>R (mΩ)</i> | 6 | 7 | 8 | 9 | 9 | 10 | 12 |
| <i>T (°C)</i> | 28 | 72 | 95 | 97 | 122 | 134 | 148 |

Б – Друга серија експеримената

Табела 1. Резултати мерења на утикачу (лицнасти проводник пресека 2,5 mm² и јачина струје 16 А)

| <i>Монофазни утикач S=2,5 mm², лицнаста жица</i> | | | | | | | |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|-----------|-----------|
| <i>M=0,1 Nm</i> | | | | | | | |
| <i>t(h)</i> | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| <i>I (A)</i> | 16,2 | 16,2 | 16,2 | 16,2 | 16,2 | 16,2 | 16,2 |
| <i>U (V)</i> | 0,049 | 0,118 | 0,128 | 0,136 | 0,149 | 0,165 | 0,171 |
| <i>R (Ω)</i> | 0,003 | 0,007 | 0,008 | 0,008 | 0,009 | 0,010 | 0,011 |
| <i>P(W)</i> | 0,8 | 1,8 | 2,1 | 2,1 | 2,4 | 2,6 | 2,9 |
| <i>T(°C)</i> | 28 | 81 | 84 | 88 | 92 | 93 | 110 |
| <i>t(h)</i> | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12h | 12h10min. |
| <i>I (A)</i> | 16,2 | 16,2 | 16,1 | 16,1 | 16,1 | 16,1 | 16,1 |
| <i>U (V)</i> | 0,186 | 0,195 | 0,217 | 0,231 | 0,235 | 0,293 | 0,8 |
| <i>R (Ω)</i> | 0,011 | 0,012 | 0,013 | 0,014 | 0,015 | 0,018 | 0,050 |
| <i>P(W)</i> | 2,9 | 3,1 | 3,4 | 3,6 | 3,9 | 4,7 | 13,0 |
| <i>T(°C)</i> | 108 | 116 | 125 | 224 | 355 | 577 | 615 |
| <i>t(h)</i> | 12h20min. | 12h30min. | 12h40min. | 12h50min. | 13h | 13h10min. | 13h13min. |
| <i>I (A)</i> | 16,1 | 16,1 | 16,1 | 16,0 | 16,0 | 15,9 | 15,8 |
| <i>U (V)</i> | 0,85 | 0,86 | 0,92 | 3,3 | 3,7 | 3,9 | 27,5 |
| <i>R (Ω)</i> | 0,053 | 0,053 | 0,057 | 0,206 | 0,231 | 0,245 | 1,741 |
| <i>P(W)</i> | 13,7 | 13,7 | 14,8 | 52,7 | 59,1 | 61,9 | 434,6 |
| <i>T(°C)</i> | 624 | 635 | 642 | 647 | 653 | 671 | >1000 |

Табела 2. Резултати мерења на утикачу (лицнасти проводник пресека $1,5 \text{ mm}^2$ и јачина струје 16 А)

| <i>Монофазни утикач $S=1,5 \text{ mm}^2$, лицнаста жица</i> | | | | | | | |
|--|-------|-------|-------|-----------|-----------|-----------|-------|
| <i>$M=0,1 \text{ Nm}$</i> | | | | | | | |
| <i>t(h)</i> | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| <i>I (A)</i> | 16,1 | 16,1 | 16,1 | 16,1 | 16,0 | 16,0 | 16,0 |
| <i>U (V)</i> | 0,048 | 0,111 | 0,135 | 0,145 | 0,157 | 0,169 | 0,199 |
| <i>R (Ω)</i> | 0,003 | 0,007 | 0,008 | 0,009 | 0,010 | 0,011 | 0,012 |
| <i>P(W)</i> | 0,8 | 1,8 | 2,1 | 2,3 | 2,6 | 2,8 | 3,1 |
| <i>T($^{\circ}\text{C}$)</i> | 27 | 77 | 85 | 87 | 93 | 96 | 98 |
| <i>t(h)</i> | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
| <i>I (A)</i> | 16,0 | 16,0 | 16,0 | 16,0 | 16,0 | 16,0 | 16,0 |
| <i>U (V)</i> | 0,212 | 0,225 | 0,239 | 0,255 | 0,356 | 0,389 | 0,412 |
| <i>R (Ω)</i> | 0,013 | 0,014 | 0,015 | 0,016 | 0,022 | 0,024 | 0,026 |
| <i>P(W)</i> | 3,3 | 3,6 | 3,8 | 4,1 | 5,6 | 6,1 | 6,7 |
| <i>T($^{\circ}\text{C}$)</i> | 102 | 107 | 110 | 117 | 249 | 271 | 376 |
| <i>t(h)</i> | 14 | 15 | 16 | 16h10min. | 16h20min. | 16h22min. | / |
| <i>I (A)</i> | 15,9 | 15,9 | 15,9 | 15,9 | 15,9 | 15,8 | / |
| <i>U (V)</i> | 0,425 | 0,435 | 0,824 | 1,23 | 3,15 | 32,5 | / |
| <i>R (Ω)</i> | 0,027 | 0,027 | 0,052 | 0,077 | 0,198 | 2,057 | / |
| <i>P(W)</i> | 6,8 | 6,8 | 13,1 | 19,5 | 50,1 | 513,5 | / |
| <i>T($^{\circ}\text{C}$)</i> | 380 | 384 | 416 | 626 | 678 | >1000 | / |

Табела 3. Резултати мерења на утичници (пун пресек проводника $2,5 \text{ mm}^2$ и јачина струје 16 А)

| <i>Монофазна утичница $S=2,5 \text{ mm}^2$, жица пуног пресека</i> | | | | | | | |
|---|-----------|-----------|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <i>$M=0,1 \text{ Nm}$</i> | | | | | | | |
| <i>t(h)</i> | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| <i>I (A)</i> | 16,3 | 16,3 | 16,2 | 16,2 | 16,1 | 16,1 | 16,1 |
| <i>U (V)</i> | 0,075 | 0,205 | 0,263 | 0,278 | 0,318 | 0,332 | 0,342 |
| <i>R (Ω)</i> | 0,005 | 0,013 | 0,016 | 0,017 | 0,020 | 0,021 | 0,021 |
| <i>P(W)</i> | 1,3 | 3,5 | 4,2 | 4,5 | 5,2 | 5,4 | 5,4 |
| <i>T($^{\circ}\text{C}$)</i> | 24 | 149 | 155 | 160 | 170 | 174 | 188 |
| <i>t(h)</i> | 7 | 8 | 9 | 10 | 10h10min. | 10h20min. | 10h30min. |
| <i>I (A)</i> | 16,1 | 16,1 | 16,1 | 16,1 | 16,0 | 15,9 | 15,9 |
| <i>U (V)</i> | 0,387 | 0,432 | 0,512 | 0,678 | 1,35 | 1,37 | 1,38 |
| <i>R (Ω)</i> | 0,024 | 0,027 | 0,032 | 0,042 | 0,084 | 0,086 | 0,087 |
| <i>P(W)</i> | 6,2 | 7,0 | 8,3 | 10,9 | 21,5 | 21,7 | 22,0 |
| <i>T($^{\circ}\text{C}$)</i> | 206 | 229 | 277 | 527 | 571 | 595 | 612 |
| <i>t(h)</i> | 10h40min. | 10h50min. | 11h | 11h10min. | 11h20min. | 11h30min. | 11h32min. |
| <i>I (A)</i> | 15,9 | 15,9 | 15,9 | 15,9 | 15,8 | 15,8 | 15,7 |
| <i>U (V)</i> | 2,5 | 2,65 | 2,69 | 2,9 | 3,1 | 3,9 | 36,7 |
| <i>R (Ω)</i> | 0,157 | 0,167 | 0,169 | 0,182 | 0,196 | 0,247 | 2,338 |
| <i>P(W)</i> | 39,7 | 42,2 | 42,7 | 46,0 | 48,9 | 61,7 | 576,3 |
| <i>T($^{\circ}\text{C}$)</i> | 618 | 621 | 639 | 650 | 654 | 682 | >1000 |

Табела 4. Резултати мерења на утичници (пун пресек проводника $1,5 \text{ mm}^2$ и јачина струје 16 А)

| <i>Монофазна утичница $S=1,5 \text{ mm}^2$, жица пуног пресека</i> | | | | | | | |
|---|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|
| <i>$M=0,1 \text{ Nm}$</i> | | | | | | | |
| <i>t(h)</i> | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| <i>I (A)</i> | 16,1 | 16,0 | 16,0 | 15,9 | 15,9 | 15,9 | 15,9 |
| <i>U (V)</i> | 0,132 | 0,185 | 0,215 | 0,253 | 0,275 | 0,296 | 0,315 |
| <i>R (Ω)</i> | 0,008 | 0,012 | 0,013 | 0,016 | 0,017 | 0,019 | 0,020 |
| <i>P(W)</i> | 2,1 | 3,1 | 3,3 | 4,0 | 4,3 | 4,8 | 5,1 |
| <i>T($^{\circ}\text{C}$)</i> | 23 | 92 | 94 | 110 | 149 | 158 | 182 |
| <i>t(h)</i> | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
| <i>I (A)</i> | 15,9 | 15,9 | 15,9 | 15,9 | 15,9 | 15,9 | 15,9 |
| <i>U (V)</i> | 0,586 | 0,615 | 0,651 | 0,695 | 0,725 | 0,737 | 0,749 |
| <i>R (Ω)</i> | 0,037 | 0,039 | 0,041 | 0,044 | 0,046 | 0,046 | 0,047 |
| <i>P(W)</i> | 9,4 | 9,9 | 10,4 | 11,1 | 11,6 | 11,6 | 11,9 |
| <i>T($^{\circ}\text{C}$)</i> | 203 | 217 | 249 | 320 | 362 | 367 | 376 |
| <i>t(h)</i> | 14 | 14h10min. | 14h20min. | 14h30min. | 14h40min. | 14h43min. | / |
| <i>I (A)</i> | 15,9 | 15,8 | 15,8 | 15,8 | 15,7 | 15,6 | / |
| <i>U (V)</i> | 0,771 | 2,15 | 2,32 | 2,59 | 3,25 | 34,5 | / |
| <i>R (Ω)</i> | 0,048 | 0,136 | 0,147 | 0,164 | 0,207 | 2,212 | / |
| <i>P(W)</i> | 12,1 | 34,0 | 36,7 | 40,9 | 51,0 | 538,3 | / |
| <i>T($^{\circ}\text{C}$)</i> | 382 | 625 | 642 | 678 | 685 | >1000 | / |

Ц – Финални експеримент

Табела 1. Резултати мерења на утичници (пун пресек проводника $2,5 \text{ mm}^2$ и јачина струје 16 А) – иницијално загревање

| <i>Монофазна утичница $S=2,5 \text{ mm}^2$, жица пуног пресека</i> | | | | | | | |
|---|-----------|-----------|-----------|-------|-------|-------|-------|
| <i>$M=0,1 \text{ Nm}$</i> | | | | | | | |
| <i>ЗАГРЕВАЊЕ</i> | | | | | | | |
| <i>t(h)</i> | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| <i>I (A)</i> | 16,2 | 16,1 | 16,1 | 16,1 | 16,1 | 16,1 | 16,1 |
| <i>U (V)</i> | 0,042 | 0,173 | 0,223 | 0,273 | 0,326 | 0,347 | 0,355 |
| <i>R (Ω)</i> | 0,003 | 0,011 | 0,014 | 0,017 | 0,020 | 0,022 | 0,022 |
| <i>T($^{\circ}\text{C}$)</i> | 27 | 137 | 147 | 151 | 164 | 187 | 190 |
| <i>t(h)</i> | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
| <i>I (A)</i> | 16,1 | 16,1 | 16,1 | 16,1 | 16,1 | 16,1 | 16,1 |
| <i>U (V)</i> | 0,365 | 0,530 | 0,570 | 0,596 | 0,615 | 0,627 | 1,27 |
| <i>R (Ω)</i> | 0,023 | 0,033 | 0,035 | 0,037 | 0,038 | 0,039 | 0,079 |
| <i>T($^{\circ}\text{C}$)</i> | 208 | 217 | 240 | 271 | 297 | 312 | 605 |
| <i>t(h)</i> | 13h10min. | 13h20min. | 13h30min. | | | | |
| <i>I (A)</i> | 16,1 | 16,0 | 16,0 | | | | |
| <i>U (V)</i> | 1,87 | 2,25 | 2,54 | | | | |
| <i>R (Ω)</i> | 0,116 | 0,141 | 0,159 | | | | |
| <i>T($^{\circ}\text{C}$)</i> | 621 | 647 | 664 | | | | |

Табела 2. Резултати мерења на утичници (пун пресек проводника $2,5 \text{ mm}^2$ и јачина струје 16 А) – прво хлађење и друго загревање

| <i>Монофазна утичница $S=2,5 \text{ mm}^2$, жица пуног пресека</i> | | | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <i>$M=0,1 \text{ Nm}$</i> | | | | | | | |
| ХЛАЂЕЊЕ | | | | | | | |
| <i>t(s)</i> | 0 | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 | 120 |
| <i>T(°C)</i> | 664 | 358 | 178 | 148 | 98 | 92 | 88 |
| <i>t(s)</i> | | 140 | 160 | 180 | 200 | 220 | 240 |
| <i>T(°C)</i> | | 85 | 82 | 80 | 76 | 74 | 72 |
| <i>t(min.)</i> | | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 |
| <i>R (Ω)</i> | 0,159 | 0,158 | 0,158 | 0,155 | 0,154 | 0,156 | 0,154 |
| <i>T(°C)</i> | | 67 | 53 | 45,5 | 33,4 | 29,6 | 27,5 |
| ЗАГРЕВАЊЕ | | | | | | | |
| <i>t (min.)</i> | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| <i>I (A)</i> | 16,0 | 16,0 | 16,0 | 16,0 | 16,0 | 16,0 | 16,0 |
| <i>U (V)</i> | | 2,58 | 2,71 | 2,85 | 2,97 | 3,24 | 3,75 |
| <i>R (Ω)</i> | 0,154 | 0,161 | 0,169 | 0,178 | 0,186 | 0,203 | 0,234 |
| <i>T(°C)</i> | 27,5 | 175 | 345 | 395 | 472 | 595 | 683 |

Табела 3. Резултати мерења на утичници (пун пресек проводника $2,5 \text{ mm}^2$ и јачина струје 16 А) – друго хлађење и треће загревање

| <i>Монофазна утичница $S=2,5 \text{ mm}^2$, жица пуног пресека</i> | | | | | | | |
|---|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <i>$M=0,1 \text{ Nm}$</i> | | | | | | | |
| ХЛАЂЕЊЕ | | | | | | | |
| <i>t(min.)</i> | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| <i>R (Ω)</i> | 0,234 | / | / | / | / | 0,233 | / |
| <i>T(°C)</i> | 683 | 175 | 121 | 102 | 90 | 81,5 | 76,2 |
| <i>t(min.)</i> | | 7 | 8 | 9 | 10 | 15 | 20 |
| <i>R (Ω)</i> | | / | / | / | 0,230 | 0,233 | 0,233 |
| <i>T(°C)</i> | | 70 | 67,5 | 60 | 57,6 | 51 | 43 |
| <i>t(min.)</i> | | 25 | 30 | | | | |
| <i>R (Ω)</i> | | 0,234 | 0,231 | | | | |
| <i>T(°C)</i> | | 33 | 29,6 | | | | |
| ЗАГРЕВАЊЕ | | | | | | | |
| <i>t(min.)</i> | Почетне вредности | 1 | 2 | 3 | | | |
| <i>I (A)</i> | 16,0 | 16,0 | 16,0 | 16,0 | | | |
| <i>U (V)</i> | | 3,85 | 3,98 | 4,15 | | | |
| <i>R (Ω)</i> | 0,231 | 0,241 | 0,249 | 0,259 | | | |
| <i>T(°C)</i> | 29,6 | 496 | 574 | 685 | | | |

Табела 4. Резултати мерења на утичници (пун пресек проводника $2,5 \text{ mm}^2$ и јачина струје 16 А) – треће хлађење и четврто загревање

| <i>Монофазна утичница $S=2.5 \text{ mm}^2$, жица пуног пресека</i> | | | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <i>$M=0.1 \text{ Nm}$</i> | | | | | | | |
| ХЛАЂЕЊЕ | | | | | | | |
| <i>t(min.)</i> | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| R (Ω) | 0,259 | / | / | / | / | 0,256 | / |
| T($^{\circ}\text{C}$) | 685 | 167 | 133 | 104 | 93 | 86 | 75 |
| <i>t(min.)</i> | | 7 | 8 | 9 | 10 | 15 | 20 |
| R (Ω) | | / | / | / | 0,258 | 0,258 | 0,258 |
| T($^{\circ}\text{C}$) | | 70 | 65 | 60 | 55 | 48 | 44 |
| <i>t(min.)</i> | | 25 | 30 | | | | |
| R (Ω) | | 0,258 | 0,260 | | | | |
| T($^{\circ}\text{C}$) | | 35 | 30,5 | | | | |
| ЗАГРЕВАЊЕ | | | | | | | |
| <i>t(s)</i> | 0 | 30 | 60 | 75 | | | |
| I (A) | 16,0 | 16,0 | 16,0 | 15,9 | | | |
| U (V) | | 4,25 | 4,37 | 28,5 | | | |
| R (Ω) | 0,260 | 0,266 | 0,273 | 1,792 | | | |
| T($^{\circ}\text{C}$) | 29,6 | 541 | 688 | >1000 | | | |

ПРИЛОГ 4

Резултати мерења реализованих за потребе развоја методе за верификацију квалитета нисконапонских електричних инсталација којом се могу детектовати струјна кола у којима постоје лоши електрични контакти

ИСПИТИВАЊЕ ШУКО-УТИЧНИЦЕ СТАРЕ 30 ГОДИНА

Табела 1. Резултати испитивања старе утичнице при називној струји јачине 16 А

| <i>Монофазна утичница, S=2,5 mm², жица пуног пресека, стари контакти</i> | | | | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|
| <i>M=0,1 Nm (лош електрични контакт)</i> | | | | | | | | |
| <i>t (h)</i> | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | |
| <i>I (A)</i> | 16,1 | 16,1 | 16,1 | 16,1 | 16,1 | 16,1 | 16,1 | |
| <i>U (V)</i> | 0,126 | 0,145 | 0,185 | 0,226 | 0,273 | 0,315 | 0,327 | |
| <i>R (Ω)</i> | 0,008 | 0,009 | 0,011 | 0,014 | 0,017 | 0,020 | 0,020 | |
| <i>T (°C)</i> | 27 | 57 | 77 | 92 | 97 | 105 | 135 | |
| <i>t (h)</i> | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | |
| <i>I (A)</i> | 16,1 | 16,1 | 16,1 | 16,1 | 16,1 | 16,1 | 16,0 | |
| <i>U (V)</i> | 0,37 | 0,41 | 0,42 | 0,53 | 0,635 | 1,17 | 2,372 | |
| <i>R (Ω)</i> | 0,023 | 0,025 | 0,026 | 0,033 | 0,039 | 0,073 | 0,148 | |
| <i>T (°C)</i> | 141 | 147 | 173 | 192 | 253 | 285 | 695 | |
| <i>t (h)</i> | 14 | 15 | | | | | | |
| <i>I (A)</i> | 16,0 | 16,0 | | | | | | |
| <i>U (V)</i> | 3,66 | 4,75 | | | | | | |
| <i>R (Ω)</i> | 0,229 | 0,297 | | | | | | |
| <i>T (°C)</i> | 730 | 770 | | | | | | |

Табела 2. Измерене отпорности петље квара и кратког споја старе утичнице

| <i>Монофазна шуко-утичница, S=2,5 mm², жица пуног пресека, стари контакти</i> | | | | | |
|--|-------------------------------|------|------------------------------|------|--|
| <i>M=1 Nm (добар електрични контакт)</i> | | | | | |
| <i>Иницијално измерена вредност отпорности петље квара и кратког споја без оптерећења</i> | <i>R_{S L-PE} (Ω)</i> | 0,46 | <i>R_{S L-N} (Ω)</i> | 0,45 | <i>Коментар: лош контакт изазван на прикључку старе утичнице који је повезан са фазним проводником</i> |
| <i>Иницијално измерена вредност отпорности петље квара и кратког споја без оптерећења</i> | <i>R_{S L-PE} (Ω)</i> | 0,46 | <i>R_{S L-N} (Ω)</i> | 0,45 | |
| <i>Измерена вредност отпорности петље квара и кратког споја после процеса загревања струјом 16 А и завршеног процеса хлађења</i> | <i>R_{S L-PE} (Ω)</i> | 0,74 | <i>R_{S L-N} (Ω)</i> | 0,73 | |

Табела 3. Хлађење електричног контакта старе утичнице и промене његове електричне отпорности (утичница је претходно била оптерећена називном јачином струје 16 А)

| <i>Процес хлађења електричног контакта</i> | | |
|--|---------------|--------------|
| <i>t (мин.)</i> | <i>T (°C)</i> | <i>R (Ω)</i> |
| 0 | 770 | 0,297 |
| 5 | 112 | / |
| 10 | 63 | / |
| 15 | 51 | / |
| 20 | 44 | / |
| 25 | 38 | / |
| 30 | 29 | 0,305 |

Табела 4. Резултати испитивања старе утичнице при струји јачине 13А

| <i>Монофазна шуко-утичница, S=2,5 mm², жица пуног пресека, стари контакти</i> | | | | | | | |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <i>M=0,1 Nm (лош електрични контакт)</i> | | | | | | | |
| <i>t (мин.)</i> | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| <i>I (A)</i> | 13,1 | 13,1 | 13,1 | 13,1 | 13,1 | 13 | 13 |
| <i>U (V)</i> | 3,92 | 4,14 | 4,25 | 4,49 | 4,71 | 5,12 | 5,50 |
| <i>R (Ω)</i> | 0,299 | 0,316 | 0,324 | 0,343 | 0,360 | 0,394 | 0,423 |
| <i>T (°C)</i> | 270 | 355 | 670 | 775 | 795 | 820 | 855 |

Табела 5. Измерене отпорности петље квара и кратког споја старе утичнице после загревања јачином струје 13 А и хлађења електричног контакта и промене његове електричне отпорности

| <i>Измерена вредност отпорности петље квара и кратког споја по завршетку хлађења</i> | | |
|--|---------------|--------------|
| <i>R_{S L-PE} (Ω)</i> | 0,87 | |
| <i>R_{S L-N} (Ω)</i> | 0,86 | |
| <i>Процес хлађења електричног контакта</i> | | |
| <i>t (мин.)</i> | <i>T (°C)</i> | <i>R (Ω)</i> |
| 0 | 855 | 0,423 |
| 5 | 125 | / |
| 10 | 65 | / |
| 15 | 52 | / |
| 20 | 45 | / |
| 25 | 39 | / |
| 30 | 30 | 0,435 |

Табела 6 Резултати испитивања старе утичнице при струји јачине 10А

| <i>Монофазна шуко-утичница, S=2,5 mm², жица пуног пресека, стари контакти</i> | | | | | | | |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <i>M=0,1 Nm (лош електрични контакт)</i> | | | | | | | |
| <i>t (мин.)</i> | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| <i>I (A)</i> | 10 | 10 | 10 | 10 | 9,9 | 9,9 | 9,9 |
| <i>U (V)</i> | 4,22 | 4,35 | 4,57 | 4,82 | 5,15 | 5,25 | 5,35 |
| <i>R (Ω)</i> | 0,422 | 0,435 | 0,457 | 0,482 | 0,520 | 0,530 | 0,540 |
| <i>T (°C)</i> | 28 | 330 | 690 | 750 | 780 | 815 | 840 |
| <i>t (мин.)</i> | 7 | | | | | | |
| <i>I (A)</i> | 9,9 | | | | | | |
| <i>U (V)</i> | 5,55 | | | | | | |
| <i>R (Ω)</i> | 0,561 | | | | | | |
| <i>T (°C)</i> | 860 | | | | | | |

Табела 7. Измерене отпорности петље квара и кратког споја старе утичнице после загревања јачином струје 10 А и хлађења електричног контакта и промене његове електричне отпорности

| <i>Измерена вредност отпорности петље квара и кратког споја по завршетку хлађења</i> | | |
|--|---------------|--------------|
| <i>R_{S L-PE} (Ω)</i> | 1,01 | |
| <i>R_{S L-N} (Ω)</i> | 0,98 | |
| <i>Процес хлађења електричног контакта</i> | | |
| <i>t (мин.)</i> | <i>T (°C)</i> | <i>R (Ω)</i> |
| 0 | 860 | 0,561 |
| 5 | 127 | / |
| 10 | 65 | / |
| 15 | 53 | / |
| 20 | 47 | / |
| 25 | 39 | / |
| 30 | 30 | 0,573 |

Табела 8. Резултати испитивања старе утичнице при струји јачине 8 А

| <i>Монофазна шуко-утичница, S=2,5 mm², жица пуног пресека, стари контакти</i> | | | | | | | |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <i>M=0,1 Nm (лош електрични контакт)</i> | | | | | | | |
| <i>t (мин.)</i> | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| <i>I (A)</i> | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| <i>U (V)</i> | 4,50 | 4,63 | 4,75 | 4,90 | 5,30 | 5,51 | 5,62 |
| <i>R (Ω)</i> | 0,563 | 0,579 | 0,594 | 0,613 | 0,663 | 0,689 | 0,703 |
| <i>T (°C)</i> | 28 | 305 | 675 | 730 | 745 | 755 | 778 |
| <i>t (мин.)</i> | 7 | 8 | 9 | | | | |
| <i>I (A)</i> | 7,9 | 7,9 | 7,9 | | | | |
| <i>U (V)</i> | 5,80 | 6,26 | 6,45 | | | | |
| <i>R (Ω)</i> | 0,734 | 0,792 | 0,816 | | | | |
| <i>T (°C)</i> | 795 | 805 | 822 | | | | |

Табела 9. Измерене отпорности петље квара и кратког споја старе утичнице после загревања јачином струје 8 А и хлађења електричног контакта и промене његове електричне отпорности

| <i>Измерена вредност отпорности петље квара и кратког споја по завршетку хлађења</i> | | |
|--|---------------|--------------|
| <i>R_{S L-PE} (Ω)</i> | 1,25 | |
| <i>R_{S L-N} (Ω)</i> | 1,23 | |
| <i>Процес хлађења електричног контакта</i> | | |
| <i>t (мин.)</i> | <i>T (°C)</i> | <i>R (Ω)</i> |
| 0 | 822 | 0,816 |
| 5 | 111 | / |
| 10 | 65 | / |
| 15 | 55 | / |
| 20 | 47 | / |
| 25 | 39 | / |
| 30 | 31 | 0,819 |

Табела 10. Резултати испитивања старе шуко-утичнице при струји јачине 6 А

| <i>Монофазна шуко-утичница, S=2,5 mm², жица пуног пресека, стари контакти</i> | | | | | | | |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <i>M=0,1 Nm (лош електрични контакт)</i> | | | | | | | |
| <i>t (мин.)</i> | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| <i>I (A)</i> | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| <i>U (V)</i> | 4,8 | 5,12 | 5,60 | 5,75 | 6,32 | 6,57 | 6,71 |
| <i>R (Ω)</i> | 0,800 | 0,853 | 0,933 | 0,958 | 1,053 | 1,095 | 1,118 |
| <i>T (°C)</i> | 28 | 335 | 685 | 720 | 758 | 783 | 795 |
| <i>t (мин.)</i> | 7 | 8 | | | | | |
| <i>I (A)</i> | 5,9 | 5,9 | | | | | |
| <i>U (V)</i> | 6,85 | 6,91 | | | | | |
| <i>R (Ω)</i> | 1,161 | 1,171 | | | | | |
| <i>T (°C)</i> | 805 | 815 | | | | | |

Табела 11. Измерене отпорности петље квара и кратког споја старе утичнице после загревања јачином струје 6 А и хлађења електричног контакта и промене његове електричне отпорности

| <i>Измерена вредност отпорности петље квара и кратког споја по завршетку хлађења</i> | | |
|--|---------------|--------------|
| <i>R_{S L-PE} (Ω)</i> | 1,60 | |
| <i>R_{S L-N} (Ω)</i> | 1,59 | |
| <i>Процес хлађења електричног контакта</i> | | |
| <i>t (мин.)</i> | <i>T (°C)</i> | <i>R (Ω)</i> |
| 0 | 815 | 1,171 |
| 5 | 113 | / |
| 10 | 68 | / |
| 15 | 57 | / |
| 20 | 49 | / |
| 25 | 39 | / |
| 30 | 31 | 1,180 |

Табела 12. Резултати испитивања старе утичнице при струји јачине 4 А

| <i>Монофазна шуко-утичница, S=2,5 mm², жица пуног пресека, стари контакти</i> | | | | | | | |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <i>M=0,1 Nm (лош електрични контакт)</i> | | | | | | | |
| <i>t (мин.)</i> | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| <i>I (A)</i> | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| <i>U (V)</i> | 4,69 | 4,85 | 5,20 | 5,62 | 6,01 | 6,35 | 6,40 |
| <i>R (Ω)</i> | 1,173 | 1,213 | 1,300 | 1,405 | 1,503 | 1,588 | 1,600 |
| <i>T (°C)</i> | 28 | 313 | 642 | 661 | 665 | 685 | 715 |
| <i>t (мин.)</i> | 7 | 8 | 9 | 10 | | | |
| <i>I (A)</i> | 4 | 4 | 3,9 | 3,9 | | | |
| <i>U (V)</i> | 6,87 | 6,95 | 7,25 | 7,33 | | | |
| <i>R (Ω)</i> | 1,718 | 1,738 | 1,859 | 1,879 | | | |
| <i>T (°C)</i> | 725 | 738 | 757 | 768 | | | |

Табела 13. Измерене отпорности петље квара и кратког споја старе утичнице после загревања јачином струје 4 А и хлађења електричног контакта и промене његове електричне отпорности

| <i>Измерена вредност отпорности петље квара и кратког споја по завршетку хлађења</i> | | |
|--|---------------|--------------|
| <i>R_{S L-PE} (Ω)</i> | 2,35 | |
| <i>R_{S L-N} (Ω)</i> | 2,32 | |
| <i>Процес хлађења електричног контакта</i> | | |
| <i>t (мин.)</i> | <i>T (°C)</i> | <i>R (Ω)</i> |
| 0 | 768 | 1,879 |
| 5 | 103 | / |
| 10 | 66 | / |
| 15 | 55 | / |
| 20 | 46 | / |
| 25 | 40 | / |
| 30 | 31 | 1,918 |

ИСПИТИВАЊЕ НОВЕ ШУКО-УТИЧНИЦЕ КОЈА ЈЕ ТРЕТИРАНА ЦАРСКОМ ВОДОМ

Табела 14. Резултати испитивања утичнице при називној струји јачине 16А

| <i>Монофазна шуко-утичница, S=2,5 mm², жица пуног пресека, кородирани контакти</i> | | | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <i>M=0,1 Nm (лош електрични контакт)</i> | | | | | | | |
| <i>t (h)</i> | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| <i>I (A)</i> | 16,1 | 16,1 | 16,1 | 16,1 | 16,1 | 16,1 | 16,1 |
| <i>U (V)</i> | 0,205 | 0,221 | 0,237 | 0,243 | 0,257 | 0,282 | 0,318 |
| <i>R (Ω)</i> | 0,013 | 0,014 | 0,015 | 0,015 | 0,016 | 0,018 | 0,020 |
| <i>T (°C)</i> | 27 | 72 | 80 | 85 | 88 | 94 | 120 |
| <i>t (h)</i> | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | / |
| <i>I (A)</i> | 16,0 | 16,0 | 16,0 | 15,9 | 15,9 | 15,8 | / |
| <i>U (V)</i> | 0,511 | 0,905 | 1,53 | 2,22 | 2,37 | 2,52 | / |
| <i>R (Ω)</i> | 0,032 | 0,057 | 0,096 | 0,140 | 0,149 | 0,159 | / |
| <i>T (°C)</i> | 196 | 270 | 439 | 634 | 667 | 728 | / |

Табела 15. Измерене вредности отпорности петље квара и кратког споја утичнице

| <i>Монофазна шуко-утичница, S=2,5 mm², жица пуног пресека, кородирани контакти</i> | | | | | |
|--|-------------------------------|------|------------------------------|------|--|
| <i>M=1 Nm (добар електрични контакт)</i> | | | | | |
| <i>Иницијално измерена вредност отпорности петље квара и кратког споја без оптерећења</i> | <i>R_{S L-PE} (Ω)</i> | 0,44 | <i>R_{S L-N} (Ω)</i> | 0,43 | |
| <i>M=0,1 Nm (лош електрични контакт)</i> | | | | | |
| <i>Иницијално измерена вредност отпорности петље квара и кратког споја без оптерећења</i> | <i>R_{S L-PE} (Ω)</i> | 0,45 | <i>R_{S L-N} (Ω)</i> | 0,44 | |
| <i>Измерена вредност отпорности петље квара и кратког споја после процеса загревања струјом 16 А и завршеног процеса хлађења</i> | <i>R_{S L-PE} (Ω)</i> | 0,59 | <i>R_{S L-N} (Ω)</i> | 0,58 | |

Коментар: лош контакт изазван на прикључку утичнице који је повезан са фазним проводником

Табела 16. Хлађење електричног контакта утичнице и промене његове електричне отпорности (утичница је претходно била оптерећена називном јачином струје 16 А)

| <i>Процес хлађења електричног контакта</i> | | |
|--|---------------|--------------|
| <i>t (мин.)</i> | <i>T (°C)</i> | <i>R (Ω)</i> |
| 0 | 728 | 0,159 |
| 5 | 89 | / |
| 10 | 54 | / |
| 15 | 48 | / |
| 20 | 41 | / |
| 25 | 36 | / |
| 30 | 29 | 0,161 |

Табела 17. Резултати испитивања утичнице при струји јачине 13 А

| <i>Монофазна шучко-утичница, S=2,5 mm², жица пуног пресека, кородиран контакт</i> | | | | | | | |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <i>M=0,1 Nm (лош електрични контакт)</i> | | | | | | | |
| <i>t (мин.)</i> | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| <i>I (A)</i> | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 12,9 |
| <i>U (V)</i> | 2,1 | 2,28 | 2,51 | 2,73 | 2,92 | 3,34 | 3,52 |
| <i>R (Ω)</i> | 0,162 | 0,175 | 0,193 | 0,210 | 0,225 | 0,257 | 0,273 |
| <i>T (°C)</i> | 27 | 356 | 731 | 757 | 773 | 794 | 810 |

Табела 18. Измерене отпорности петље квара и кратког споја утичнице после загревања јачином струје 13 А и хлађења електричног контакта и промене његове електричне отпорности

| <i>Измерена вредност отпорности петље квар и кратког споја по завршетку хлађења</i> | | |
|---|---------------|--------------|
| <i>R_{SL-PE} (Ω)</i> | 0,69 | |
| <i>R_{SL-N} (Ω)</i> | 0,68 | |
| <i>Процес хлађења електричног контакта</i> | | |
| <i>t (мин.)</i> | <i>T (°C)</i> | <i>R (Ω)</i> |
| 0 | 810 | 0,273 |
| 5 | 131 | / |
| 10 | 92 | / |
| 15 | 50 | / |
| 20 | 42 | / |
| 25 | 35 | / |
| 30 | 29 | 0,279 |

Табела 19. Резултати испитивања утичнице при струји јачине 10 А

| <i>Монофазна шучко-утичница, S=2,5 mm², жица пуног пресека, кородиран контакт</i> | | | | | | | |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <i>M=0,1 Nm (лош електрични контакт)</i> | | | | | | | |
| <i>t (мин.)</i> | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| <i>I (A)</i> | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 9,9 |
| <i>U (V)</i> | 2,7 | 2,82 | 2,91 | 3,07 | 3,22 | 3,32 | 3,55 |
| <i>R (Ω)</i> | 0,270 | 0,282 | 0,291 | 0,307 | 0,322 | 0,332 | 0,359 |
| <i>T (°C)</i> | 27 | 355 | 678 | 715 | 735 | 752 | 776 |
| <i>t (мин.)</i> | 7 | | | | | | |
| <i>I (A)</i> | 9,9 | | | | | | |
| <i>U (V)</i> | 3,75 | | | | | | |
| <i>R (Ω)</i> | 0,379 | | | | | | |
| <i>T (°C)</i> | 805 | | | | | | |

Табела 20. Измерене отпорности петље квара и кратког споја утичнице после загревања јачином струје 10 А и хлађења електричног контакта и промене његове електричне отпорности

| <i>Измерена вредност отпорности петље квара и кратког споја по завршетку хлађења</i> | | |
|--|----------|------------------|
| $R_{S-L-PE} (\Omega)$ | 0,80 | |
| $R_{S-L-N} (\Omega)$ | 0,78 | |
| <i>Процес хлађења електричног контакта</i> | | |
| t (мин.) | T (°C) | R (Ω) |
| 0 | 805 | 0,379 |
| 5 | 127 | / |
| 10 | 90 | / |
| 15 | 53 | / |
| 20 | 40 | / |
| 25 | 33 | / |
| 30 | 29 | 0,388 |

Табела 21. Резултати испитивања утичнице при струји јачине 8 А

| <i>Монофазна шучко-утичница, $S=2,5 \text{ mm}^2$, жица пуног пресека, кородирани контакт</i> | | | | | | | |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <i>$M=0,1 \text{ Nm}$ (лош електрични контакт)</i> | | | | | | | |
| t (мин.) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| I (А) | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 7,9 |
| U (V) | 3,1 | 3,21 | 3,38 | 3,47 | 3,56 | 3,9 | 4,12 |
| R (Ω) | 0,388 | 0,401 | 0,423 | 0,434 | 0,445 | 0,488 | 0,522 |
| T (°C) | 28 | 358 | 728 | 753 | 770 | 810 | 826 |
| t (мин.) | 7 | 8 | 9 | | | | |
| I (А) | 7,9 | 7,9 | 7,9 | | | | |
| U (V) | 5,03 | 5,23 | 5,28 | | | | |
| R (Ω) | 0,637 | 0,662 | 0,668 | | | | |
| T (°C) | 852 | 875 | 890 | | | | |

Табела 22. Измерене отпорности петље квара и кратког споја утичнице после загревања јачином струје 8 А и хлађења електричног контакта и промене његове електричне отпорности

| <i>Измерена вредност отпорности петље квара и кратког споја по завршетку хлађења</i> | | |
|--|----------|------------------|
| $R_{S-L-PE} (\Omega)$ | 1,08 | |
| $R_{S-L-N} (\Omega)$ | 0,95 | |
| <i>Процес хлађења електричног контакта</i> | | |
| t (мин.) | T (°C) | R (Ω) |
| 0 | 890 | 0,668 |
| 5 | 154 | / |
| 10 | 113 | / |
| 15 | 57 | / |
| 20 | 44 | / |
| 25 | 36 | / |
| 30 | 30 | 0,674 |

Табела 23. Резултати испитивања утичнице при струји јачине 6 А

| Монофазна шуко-утичница, $S=2,5 \text{ mm}^2$, жица пуног пресека, кородиран контакт | | | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| M=0,1 Nm (лош електрични контакт) | | | | | | | |
| <i>t</i> (мин.) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| <i>I</i> (A) | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| <i>U</i> (V) | 3,9 | 4,71 | 4,88 | 5,05 | 5,43 | 6,10 | 6,15 |
| <i>R</i> (Ω) | 0,650 | 0,785 | 0,813 | 0,842 | 0,905 | 1,017 | 1,025 |
| <i>T</i> ($^{\circ}\text{C}$) | 28 | 375 | 715 | 755 | 788 | 815 | 830 |
| <i>t</i> (мин.) | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | | |
| <i>I</i> (A) | 6 | 6 | 5,9 | 5,9 | 5,9 | | |
| <i>U</i> (V) | 6,20 | 6,25 | 6,27 | 6,29 | 6,30 | | |
| <i>R</i> (Ω) | 1,033 | 1,042 | 1,063 | 1,066 | 1,068 | | |
| <i>T</i> ($^{\circ}\text{C}$) | 835 | 845 | 848 | 861 | 872 | | |

Табела 24. Измерене отпорности петље квара и кратког споја утичнице после загревања јачином струје 6 А и хлађења електричног контакта и промене његове електричне отпорности

| Измерена вредност отпорности петље квара и кратког споја по завршетку хлађења | | |
|---|---------------------------------|-----------------------|
| $R_{S L-FE} (\Omega)$ | 1,49 | |
| $R_{S L-N} (\Omega)$ | 1,46 | |
| Процес хлађења електричног контакта | | |
| <i>t</i> (мин.) | <i>T</i> ($^{\circ}\text{C}$) | <i>R</i> (Ω) |
| 0 | 872 | 1,068 |
| 5 | 146 | / |
| 10 | 107 | / |
| 15 | 53 | / |
| 20 | 43 | / |
| 25 | 32 | / |
| 30 | 29 | 1,077 |

Табела 25. Резултати испитивања утичнице при струји јачине 4 А

| Монофазна шуко-утичница, $S=2,5 \text{ mm}^2$, жица пуног пресека, кородиран контакт | | | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| M=0,1 Nm (лош електрични контакт) | | | | | | | |
| <i>t</i> (мин.) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| <i>I</i> (A) | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| <i>U</i> (V) | 4,05 | 4,3 | 4,8 | 5,7 | 6,25 | 6,35 | 6,56 |
| <i>R</i> (Ω) | 1,013 | 1,075 | 1,200 | 1,425 | 1,563 | 1,588 | 1,640 |
| <i>T</i> ($^{\circ}\text{C}$) | 27 | 325 | 576 | 658 | 720 | 735 | 745 |
| <i>t</i> (мин.) | 7 | 8 | 9 | | | | |
| <i>I</i> (A) | 4 | 3,9 | 3,9 | | | | |
| <i>U</i> (V) | 6,62 | 6,95 | 7,15 | | | | |
| <i>R</i> (Ω) | 1,655 | 1,782 | 1,833 | | | | |
| <i>T</i> ($^{\circ}\text{C}$) | 771 | 780 | 795 | | | | |

Табела 26. Измерене отпорности петље квара и кратког споја утичнице после загревања јачином струје 4 А и хлађења електричног контакта и промене његове електричне отпорности

| <i>Измерена вредност отпорности петље квара и кратког споја по завршетку хлађења</i> | | |
|--|-----------------|-----------------|
| $R_{S\ L-PE} (\Omega)$ | 2,18 | |
| $R_{S\ L-N} (\Omega)$ | 2,05 | |
| <i>Процес хлађења електричног контакта</i> | | |
| <i>t (мин.)</i> | <i>t (мин.)</i> | <i>t (мин.)</i> |
| 0 | 795 | 1,833 |
| 5 | 138 | / |
| 10 | 118 | / |
| 15 | 43 | / |
| 20 | 37 | / |
| 25 | 32 | / |
| 30 | 29 | 1,841 |

ИСПИТИВАЊЕ НОВЕ ШУКО-УТИЧНИЦЕ КОЈА ЈЕ ТРЕТИРАНА КОНЦЕНТРОВАНОМ СУМПОРНОМ КИСЕЛИНОМ

Табела 27. Резултати испитивања утичнице при називној струји јачине 16А

| <i>Монофазна шуко-утичница, S=2,5 mm², жица пуног пресека, кородиран контакт</i> | | | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <i>M=0,1 Nm (лош електрични контакт)</i> | | | | | | | |
| <i>t (h)</i> | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| <i>I (A)</i> | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 |
| <i>U (V)</i> | 0,356 | 0,41 | 0,495 | 0,535 | 0,615 | 0,774 | 0,94 |
| <i>R (Ω)</i> | 0,022 | 0,026 | 0,031 | 0,033 | 0,038 | 0,048 | 0,059 |
| <i>T (°C)</i> | 28 | 76 | 135 | 161 | 195 | 237 | 287 |
| <i>t (h)</i> | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | | |
| <i>I (A)</i> | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | | |
| <i>U (V)</i> | 1,21 | 1,45 | 2,06 | 2,67 | 3,45 | | |
| <i>R (Ω)</i> | 0,076 | 0,091 | 0,129 | 0,167 | 0,216 | | |
| <i>T (°C)</i> | 338 | 363 | 586 | 670 | 865 | | |

Табела 28. Измерене отпорности петље квара и кратког споја утичнице

| <i>Монофазна шуко-утичница, S=2,5 mm², жица пуног пресека, кородиран контакти</i> | | | | | | |
|--|------------------------|------|-----------------------|------|--|--|
| <i>M=1 Nm (добар електрични контакт)</i> | | | | | | |
| <i>Иницијално измерена вредност отпорности петље квара и кратког споја без оптерећења</i> | $R_{S\ L-PE} (\Omega)$ | 0,47 | $R_{S\ L-N} (\Omega)$ | 0,46 | <i>Коментар: лош контакт изазван на прикључку утичнице који је повезан са неутралним проводником</i> | |
| <i>M=0,1 Nm (лош електрични контакт)</i> | | | | | | |
| <i>Иницијално измерена вредност отпорности петље квара и кратког споја без оптерећења</i> | | 0,47 | | 0,46 | | |
| <i>Измерена вредност отпорности петље квара и кратког споја после процеса загревања струјом 16 А и завршеног процеса хлађења</i> | $R_{S\ L-PE} (\Omega)$ | 0,48 | $R_{S\ L-N} (\Omega)$ | 0,66 | | |

Табела 29. Хлађење електричног контакта утичнице и промене његове електричне отпорности (утичница је претходно била оптерећена називном јачином струје 16 А)

| <i>Процес хлађења електричног контакта</i> | | |
|--|---------------|--------------|
| <i>t (мин.)</i> | <i>T (°C)</i> | <i>R (Ω)</i> |
| 0 | 865 | 0,216 |
| 5 | 149 | / |
| 10 | 98 | / |
| 15 | 65 | / |
| 20 | 53 | / |
| 25 | 42 | / |
| 30 | 35 | / |
| 35 | 31 | / |
| 40 | 29 | 0,218 |

Табела 30. Резултати испитивања утичнице при струји јачине 13 А

| <i>Монофазна шучко-утичница, S=2,5 mm², жица пуног пресека, кородирани контакт</i> | | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <i>M=0,1 Nm (лош електрични контакт)</i> | | | | | | |
| <i>t (мин.)</i> | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| <i>I (A)</i> | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 12,9 |
| <i>U (V)</i> | 2,8 | 2,95 | 3,26 | 3,45 | 3,67 | 3,85 |
| <i>R (Ω)</i> | 0,215 | 0,227 | 0,251 | 0,265 | 0,282 | 0,298 |
| <i>T (°C)</i> | 29 | 354 | 570 | 645 | 770 | 815 |

Табела 31. Измерене отпорности петље квара и кратког споја утичнице после загревања јачином струје 13 А и хлађења електричног контакта и промене његове електричне отпорности

| <i>Измерена вредност отпорности петље квара и кратког споја по завршетку хлађења</i> | | |
|--|---------------|--------------|
| <i>R_{SL-PE} (Ω)</i> | 0,49 | |
| <i>R_{SL-N} (Ω)</i> | 0,75 | |
| <i>Процес хлађења електричног контакта</i> | | |
| <i>t (мин.)</i> | <i>T (°C)</i> | <i>R (Ω)</i> |
| 0 | 815 | 0,298 |
| 5 | 135 | / |
| 10 | 86 | / |
| 15 | 60 | / |
| 20 | 49 | / |
| 25 | 37 | / |
| 30 | 32 | / |
| 35 | 29 | 0,304 |

Табела 32. Резултати испитивања утичнице при струји јачине 10 А

| <i>Монофазна шучко-утичница, S=2,5 mm², жица пуног пресека, кородирани контакт</i> | | | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <i>M=0,1 Nm (лош електрични контакт)</i> | | | | | | | |
| <i>t (мин.)</i> | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| <i>I (A)</i> | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 9,9 |
| <i>U (V)</i> | 3,0 | 3,189 | 3,32 | 3,85 | 4,15 | 4,35 | 4,55 |
| <i>R (Ω)</i> | 0,300 | 0,319 | 0,332 | 0,385 | 0,415 | 0,435 | 0,460 |
| <i>T (°C)</i> | 28 | 385 | 428 | 580 | 670 | 720 | 780 |
| <i>t (мин.)</i> | 7 | | | | | | |
| <i>I (A)</i> | 9,9 | | | | | | |
| <i>U (V)</i> | 4,60 | | | | | | |
| <i>R (Ω)</i> | 0,465 | | | | | | |
| <i>T (°C)</i> | 825 | | | | | | |

Табела 33. Измерене отпорности петље квара и кратког споја утичнице после загревања јачином струје 10 А и хлађења електричног контакта и промене његове електричне отпорности

| <i>Измерена вредност отпорности петље квара и кратког споја по завршетку хлађења</i> | | |
|--|----------|------------------|
| $R_{S-L-PE} (\Omega)$ | 0,49 | |
| $R_{S-L-N} (\Omega)$ | 0,92 | |
| <i>Процес хлађења електричног контакта</i> | | |
| t (мин.) | T (°C) | R (Ω) |
| 0 | 825 | 0,465 |
| 5 | 142 | / |
| 10 | 86 | / |
| 15 | 59 | / |
| 20 | 46 | / |
| 25 | 35 | / |
| 30 | 29 | 0,477 |

Табела 34. Резултати испитивања утичнице при струји јачине 8 А

| <i>Монофазна шуко-утичница, $S=2,5 \text{ mm}^2$, жица пуног пресека, кородирани контакт</i> | | | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <i>$M=0,1 \text{ Nm}$ (лош електрични контакт)</i> | | | | | | | |
| t (мин.) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| I (А) | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 7,9 | 7,9 |
| U (V) | 3,65 | 3,77 | 3,95 | 4,18 | 4,28 | 4,41 | 4,65 |
| R (Ω) | 0,456 | 0,471 | 0,494 | 0,523 | 0,535 | 0,558 | 0,589 |
| T (°C) | 28 | 576 | 645 | 673 | 697 | 725 | 770 |

Табела 35. Измерене отпорности петље квара и кратког споја утичнице после загревања јачином струје 8 А и хлађења електричног контакта и промене његове електричне отпорности

| <i>Измерена вредност отпорности петље квара и кратког споја по завршетку хлађења</i> | | |
|--|----------|------------------|
| $R_{S-L-PE} (\Omega)$ | 0,50 | |
| $R_{S-L-N} (\Omega)$ | 0,96 | |
| <i>Процес хлађења електричног контакта</i> | | |
| t (мин.) | T (°C) | R (Ω) |
| 0 min | 770 | 0,589 |
| 5 min | 133 | / |
| 10 min | 84 | / |
| 15 min | 56 | / |
| 20 min | 44 | / |
| 25 min | 33 | / |
| 30 min | 29 | 0,592 |

Табела 36. Резултати испитивања утичнице при струји јачине 6 А

| <i>Монофазна шуко-утичница, $S=2,5 \text{ mm}^2$, жица пуног пресека, кородирани контакт</i> | | | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <i>$M=0,1 \text{ Nm}$ (лош електрични контакт)</i> | | | | | | | |
| t (мин.) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| I (А) | 6,1 | 6,1 | 6,1 | 6,1 | 6,1 | 6,1 | 6,0 |
| U (V) | 3,5 | 3,62 | 3,75 | 3,87 | 4,25 | 4,75 | 4,85 |
| R (Ω) | 0,574 | 0,593 | 0,615 | 0,634 | 0,697 | 0,779 | 0,808 |
| T (°C) | 28 | 534 | 620 | 649 | 685 | 715 | 725 |
| t (мин.) | 7 | 8 | 9 | | | | |
| I (А) | 6,0 | 6,0 | 6,0 | | | | |
| U (V) | 4,9 | 4,97 | 5,15 | | | | |
| R (Ω) | 0,817 | 0,828 | 0,858 | | | | |
| T (°C) | 734 | 745 | 750 | | | | |

Табела 37. Измерене отпорности петље квара и кратког споја утичнице после загревања јачином струје 6 А и хлађења електричног контакта и промене његове електричне отпорности

| <i>Измерена вредност отпорности петље квара и кратког споја по завршетку хлађења</i> | | |
|--|----------|------------------|
| $R_{S L-PE} (\Omega)$ | 0,50 | |
| $R_{S L-N} (\Omega)$ | 1,30 | |
| <i>Процес хлађења електричног контакта</i> | | |
| t (мин.) | T (°C) | R (Ω) |
| 0 | 750 | 0,858 |
| 5 | 132 | / |
| 10 | 83 | / |
| 15 | 53 | / |
| 20 | 42 | / |
| 25 | 31 | / |
| 30 | 28 | 0,862 |

Табела 38. Резултати испитивања утичнице при струји јачине 4 А

| <i>Монофазна шуро-утичница, $S=2,5 \text{ mm}^2$, жица пуног пресека, кородиран контакт</i> | | | | | | | |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <i>$M=0,1 \text{ Nm}$ (лош електрични контакт)</i> | | | | | | | |
| t (мин.) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| I (А) | 4,1 | 4,1 | 4,1 | 4,1 | 4,1 | 4,1 | 4,1 |
| U (V) | 3,4 | 3,55 | 3,78 | 4,20 | 4,45 | 4,78 | 5,15 |
| R (Ω) | 0,829 | 0,866 | 0,922 | 1,024 | 1,085 | 1,166 | 1,256 |
| T (°C) | 28 | 345 | 478 | 490 | 515 | 525 | 531 |
| t (мин.) | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
| I (А) | 4,1 | 4,1 | 4,1 | 4,1 | 4,1 | 4,1 | 4,1 |
| U (V) | 5,35 | 5,55 | 5,61 | 5,8 | 6,1 | 6,25 | 6,45 |
| R (Ω) | 1,305 | 1,354 | 1,368 | 1,415 | 1,488 | 1,524 | 1,573 |
| T (°C) | 549 | 565 | 570 | 581 | 590 | 595 | 611 |
| t (мин.) | 14 | 15 | 16 | 17 | | | |
| I (А) | 4,0 | 4,0 | 4,0 | 4,0 | | | |
| U (V) | 6,73 | 7,1 | 7,25 | 7,29 | | | |
| R (Ω) | 1,683 | 1,775 | 1,813 | 1,823 | | | |
| T (°C) | 628 | 633 | 640 | 642 | | | |

Табела 39. Измерене отпорности петље квара и кратког споја утичнице после загревања јачином струје 4 А и хлађења електричног контакта и промене његове електричне отпорности

| <i>Измерена вредност отпорности петље квара и кратког споја по завршетку хлађења</i> | | |
|--|----------|------------------|
| $R_{S L-PE} (\Omega)$ | 0,50 | |
| $R_{S L-N} (\Omega)$ | 2,26 | |
| <i>Процес хлађења електричног контакта</i> | | |
| t (мин.) | T (°C) | R (Ω) |
| 0 | 642 | 1,823 |
| 5 | 111 | / |
| 10 | 72 | / |
| 15 | 44 | / |
| 20 | 35 | / |
| 25 | 30 | / |
| 30 | 28 | 1,835 |

ПРИЛОГ 5

Резултати верификације квалитета нисконапонских електричних инсталација у стамбеним јединицама различите старости (10–60 година) применом нове методологије

| Редни број стана | Старост зграде (године) | Мерење | трофазна шуко-утичница | | | монофазне шуко-утичнице | | | | | | | | | |
|------------------|-------------------------|----------------------|------------------------|--------------|--------------|-------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|--------------|--------------|
| | | | фаза 1 | фаза 2 | фаза 3 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 1 | 10 | $R_{SL-PE} (\Omega)$ | 0,52 | 0,51 | 0,53 | 0,47 | 0,46 | 0,48 | 0,47 | 0,48 | 0,49 | 0,50 | 0,49 | 0,48 | 0,48 |
| | | $R_{SL-N} (\Omega)$ | 0,50 | 0,50 | 0,51 | 0,45 | 0,45 | 0,47 | 0,46 | 0,46 | 0,47 | 0,48 | 0,47 | 0,46 | 0,46 |
| 2 | 10 | $R_{SL-PE} (\Omega)$ | 0,56 | 0,55 | 0,57 | 0,49 | 0,46 | 0,48 | 1,23! | 0,48 | 0,49 | 0,48 | 0,49 | 0,51 | 0,50 |
| | | $R_{SL-N} (\Omega)$ | 0,47 | 0,48 | 0,49 | 0,49 | 0,47 | 0,48 | 0,47 | 0,47 | 0,48 | 0,47 | 0,48 | 0,47 | 0,48 |
| 3 | 20 | $R_{SL-PE} (\Omega)$ | 0,39 | 0,39 | 0,40 | 0,34 | 0,35 | 0,36 | 0,36 | 0,38 | 0,35 | 0,37 | 0,39 | 0,38 | 0,36 |
| | | $R_{SL-N} (\Omega)$ | 0,35 | 0,36 | 0,37 | 0,33 | 0,32 | 0,33 | 0,35 | 0,34 | 0,34 | 0,33 | 0,34 | 0,35 | 0,35 |
| 4 | 20 | $R_{SL-PE} (\Omega)$ | 0,51 | 0,50 | 0,50 | 0,44 | 0,43 | 0,44 | 0,44 | 0,43 | 1,34! | 0,42 | 0,44 | 0,46 | 0,45 |
| | | $R_{SL-N} (\Omega)$ | 0,49 | 0,49 | 0,48 | 0,44 | 0,42 | 0,43 | 0,44 | 0,42 | 1,33! | 0,41 | 0,43 | 0,45 | 0,44 |
| 5 | 20 | $R_{SL-PE} (\Omega)$ | 0,43 | 0,42 | 0,44 | 0,36 | 0,37 | 0,34 | 0,38 | 0,35 | 0,34 | 0,35 | 0,35 | 0,34 | 0,36 |
| | | $R_{SL-N} (\Omega)$ | 0,40 | 0,39 | 0,40 | 0,35 | 0,37 | 0,32 | 0,36 | 0,33 | 0,31 | 0,33 | 0,34 | 0,33 | 0,34 |
| 6 | 30 | $R_{SL-PE} (\Omega)$ | 0,67 | 0,66 | 0,65 | 0,55 | 0,57 | 0,58 | 0,57 | 0,59 | 0,58 | 0,58 | 0,59 | 0,59 | 0,57 |
| | | $R_{SL-N} (\Omega)$ | 0,65 | 0,62 | 0,63 | 0,53 | 0,55 | 0,55 | 0,56 | 0,55 | 0,57 | 0,57 | 0,56 | 0,57 | 0,55 |
| 7 | 35 | $R_{SL-PE} (\Omega)$ | 58,4! | 58,5! | 58,6! | 58,5! | 58,7! | 58,6! | 59,5! | 58,7! | 58,9! | 58,8! | 58,7! | 58,7! | 58,7! |
| | | $R_{SL-N} (\Omega)$ | 0,68 | 0,67 | 0,65 | 0,61 | 0,60 | 0,62 | 0,60 | 0,61 | 0,61 | 0,60 | 0,62 | 0,62 | 0,64 |
| 8 | 35 | $R_{SL-PE} (\Omega)$ | 0,67 | 0,66 | 0,66 | 0,48 | 0,49 | 0,49 | 0,48 | 0,50 | 0,51 | 0,50 | 0,53 | 0,52 | 0,53 |
| | | $R_{SL-N} (\Omega)$ | 0,56 | 0,58 | 0,57 | 0,47 | 0,48 | 0,47 | 0,47 | 0,48 | 0,47 | 0,48 | 0,48 | 0,49 | 0,49 |
| 9 | 35 | $R_{SL-PE} (\Omega)$ | 0,59 | 0,58 | 0,58 | 0,49 | 0,47 | 0,45 | 0,46 | 0,47 | 0,48 | 0,49 | 0,48 | 0,50 | 0,51 |
| | | $R_{SL-N} (\Omega)$ | 0,44 | 0,45 | 0,44 | 0,47 | 0,46 | 0,44 | 0,45 | 0,46 | 0,45 | 0,46 | 0,46 | 0,46 | 0,47 |
| 10 | 35 | $R_{SL-PE} (\Omega)$ | 0,71 | 0,72 | 0,70 | 0,70 | 0,69 | 0,69 | 0,67 | 0,67 | 0,68 | 0,69 | 0,68 | 0,67 | 0,70 |
| | | $R_{SL-N} (\Omega)$ | 0,66 | 0,68 | 0,69 | 0,69 | 0,68 | 0,67 | 0,65 | 0,65 | 0,67 | 0,68 | 0,67 | 0,66 | 0,67 |
| 11 | 40 | $R_{SL-PE} (\Omega)$ | 0,72 | 0,73 | 0,72 | 0,58 | 0,57 | 0,58 | 0,55 | 0,56 | 0,58 | 0,57 | 0,57 | 0,59 | 0,58 |
| | | $R_{SL-N} (\Omega)$ | 0,55 | 0,56 | 0,56 | 0,52 | 0,53 | 0,51 | 0,52 | 0,53 | 0,54 | 0,54 | 0,55 | 0,55 | 0,56 |
| 12 | 45 | $R_{SL-PE} (\Omega)$ | 0,59 | 0,58 | 0,58 | 1,28! | 0,65 | 0,64 | 0,61 | 0,60 | 0,61 | 0,60 | 0,60 | 0,59 | 0,58 |
| | | $R_{SL-N} (\Omega)$ | 0,57 | 0,55 | 0,57 | 0,58 | 0,59 | 0,63 | 0,59 | 0,60 | 0,58 | 0,57 | 0,58 | 0,58 | 0,55 |
| 13 | 50 | $R_{SL-PE} (\Omega)$ | 0,52 | 0,53 | 0,51 | 0,50 | 0,48 | 0,47 | 0,49 | 0,48 | 0,47 | 0,50 | 0,47 | 0,48 | 0,50 |
| | | $R_{SL-N} (\Omega)$ | 0,50 | 0,51 | 0,48 | 0,48 | 0,46 | 0,46 | 0,48 | 0,45 | 0,44 | 0,49 | 0,46 | 0,44 | 0,49 |
| 14 | 60 | $R_{SL-PE} (\Omega)$ | 2,25! | 2,27! | 2,28! | 0,51 | 0,52 | 0,53 | 0,52 | 0,54 | 157,3! | 151,4! | 155,5! | 0,54 | 0,50 |
| | | $R_{SL-N} (\Omega)$ | 0,51 | 0,51 | 0,53 | 0,49 | 0,50 | 0,50 | 0,51 | 0,52 | 0,50 | 0,52 | 0,51 | 0,50 | 0,48 |
| 15 | 60 | $R_{SL-PE} (\Omega)$ | 1,54! | 1,53! | 1,55! | 0,42 | 0,39 | 0,40 | 0,39 | 0,44 | 0,41 | 0,42 | 0,43 | 0,41 | 0,43 |
| | | $R_{SL-N} (\Omega)$ | 0,40 | 0,41 | 0,40 | 0,38 | 0,37 | 0,39 | 0,38 | 0,41 | 0,38 | 0,39 | 1,41! | 0,40 | 0,40 |

БИОГРАФИЈА АУТОРА

Мр Неџад Хаџиефендић је рођен у Прокупљу, 9. априла 1971. године. Електротехнички факултет Универзитета у Београду уписао је 1992. године, где је дипломирао 1997. године. Завршио је Енергетски одсек – смер Енергетски претварачи и погони са просечном оценом 8,75 као студент генерације. Магистрирао је на Електротехничком факултету Универзитета у Београду (2001) – постдипломске студије је завршио са просечном оценом 10. Његов магистарски рад под насловом „Заштита од штетних ефеката појаве редног електричног лука у нисконапонским електричним инсталацијама“ припада области заштите од пожара. Положио је стручне испите за пројектовање електроенергетских инсталација ниског и средњег напона (2003) и обављање послова заштите од пожара (2006), безбедности и здравља на раду (2007) и испитивања услова радне околине (2010). Значајно је допринео формирању две нове лабораторије на Електротехничком факултету Универзитета у Београду: Лабораторије за испитивање нисконапонских електричних и громобранских заштитних инсталација и Лабораторије за испитивање услова радне околине. У обе лабораторије има функцију одговорног лица. Објавио је 4 научна рада из области заштите од пожара (3 из области докторске дисертације) у еминентним светским часописима са импакт фактором, као и укупно 26 научностручних радова у домаћим часописима и на међународним и домаћим конференцијама (17 из области заштите од пожара). Од 2004. године редован је учесник на пројектима Министарства просвете, науке и технолошког развоја, од којих је последњи у директној вези са облашћу заштите од пожара: Препоруке за извођење и правилно коришћење нисконапонских електричних и громобранских заштитних инсталација и развој методологије за верификацију њиховог квалитета са аспекта заштите грађевинских објеката од пожара – ТР 36018 (2011–2019). Рад на докторској дисертацији на Електротехничком факултету Универзитета у Београду започео је 2011, а 2014. године прихваћена му је тема дисертације под насловом „Утицај лоших електричних контаката на настанак почетног пожара и метода за њихово откривање у нисконапонским електричним инсталацијама“.

Библиографија мр Нецада Хаџиефендића

I Радови у међународним часописима са SCI листе

1. Hadziefendic N., Kostic M., Radakovic Z.: *Detection of series arcing in low-voltage electrical installations*, ETEP, Vol. 19, 2009, pp. 423-432, **DOI:** 10.1002/etep.229 (M23) (IF 0.338).
2. Hadziefendic N., Davidovic M., Djordjevic V., Kostic M.: *The Impact of an Incomplete Overlap of a Copper Conductor and the Corresponding Terminal on the Contact Temperature*, IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, Vol. 7, Issue 10, 2017, pp. 1644-1654, **DOI:** 10.1109/TCPMT.2017.2720421 (M22) (IF 1.581).
3. Hadziefendic N., Trifunovic J., Kostic M.: *Effects of a Reduced Torque on Heating of Electrical Contacts in Plugs and Receptacles*, IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, Vol. 8, Issue 11, 2018, pp. 1905-1913, **DOI:** 10.1109/TCPMT.2018.2827080 (M22) (IF 1.581).
4. Hadziefendic N., Kostic N., Trifunovic J., Kostic M.: *Detection of Poor Contacts in Low-Voltage Electrical Installations*, IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, Vol. 9, Issue 1, 2019, pp. 129-137, **DOI:** 10.1109/TCPMT.2018.2882626 (M22) (IF 1.581).

II Радови у домаћим часописима

5. Радаковић З., Костић М., Хаџиефендић Н.: *Детекција редног електричног лука у нисконапонским електричним инсталацијама*, Електродистрибуција Београд, Год. 31, бр. 1, 2003, стр. 15-23 (M52), ISSN 1452 - 0753.
6. Радаковић З., Хаџиефендић Н., Милосављевић Љ.: *Електроиндукциони уређај за мрежну учестаност*, Техника, Вол. 23, бр. 2, 2004, стр. 7-16 (M52), ISSN 0040-2176.
7. Хаџиефендић Н., Трифуновић Ј., Костић Н., Костић М.: *Анализа утицаја лоших контаката у електричним инсталацијама на изазивање пожара*, Техника, Вол. 68, бр. 1, 2013, стр. 81-87 (M52), ISSN 0040-2176.
8. Костић Н., Вуковић М., Хаџиефендић Н.: *Методологија за превентивне периодичне прегледе нисконапонских електричних инсталација у зградама*, Техника, Вол. 68, бр. 2, 2013, стр. 285-292 (M52), ISSN 0040-2176.

9. Давидовић М., Хаџиефендић Н., Трифуновић Ј.: *Опасност од настанка пожара услед коришћења електроинсталационих компоненти лошег квалитета – продужни каблови*, Безбедност, Вол. 55, бр. 1, 2013, стр. 140-159 (M53), ISSN 0409-2953.
10. Hadziefendic N., Zarev I., Djenic N., Medic M.: *Fires on the household low-voltage distribution board caused by the absence of pole mounted fuses and surge arresters*, Safety Engineering, Vol. 3, No. 4, 2013, str. 167-173 (M53), ISSN 2334-6353.
11. Зарев И., Хаџиефендић Н.: *Откривање редног електричног лука у нисконапонским електричним инсталацијама употребом савремених заштитних компоненти*, Техника, Вол. 69, бр. 4, 2014, стр. 637-644 (M51), ISSN 0040-2176.
12. Ђенић Н., Зарев И., Костић Н., Хаџиефендић Н., Трифуновић Ј., Живановић Ј.: *Превентивни термовизијски преглед електричних контаката*, Заштита у пракси, Вол. XXV, бр. 287, 2018, стр. 15-21, ISSN 1451-1142.

III Радови саопштени на међународним конференцијама

13. Mandic-Lukic J., Simic N., Milinkovic B., Hadziefendic N.: *Presentation of the Results of Measuring Characteristics of Power Line Installations in the Signals Transmission*, XLIV International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies, Veliko Trnovo, Bulgaria 2009, pp. 71-77 (M33), ISSN 0957-4174.
14. Мандић-Лукић Ј., Хаџиефендић Н., Симић Н.: *Електроенергетске инсталације као телекомуникациони трансмисиони медијум*, XVII ТЕЛФОР, Београд 2009, стр. 443-446 (M33), ISSN 1821-3251.
15. Мандић-Лукић Ј., Симић Н., Хаџиефендић Н.: *Резултати испитивања нисконапонских мрежа у функцији преноса широкопојасних сигнала*, XVIII ТЕЛФОР, Београд 2010, стр. 529-532 (M33), ISSN 1821-3251.
16. Костић М., Ђокић Л., Хаџиефендић Н., Костић Н.: *Испитивање квалитета осветљења радних места – луксметар није довољан*, 7. Међународно

саветовање Ризик и безбедносни инжењеринг, Копаоник 2012, стр. 199-203 (М33), ISBN 978-86-6211-006-0.

17. Костић Н., Хаџиефендић Н.: *Развој уређаја за детекцију редног електричног лука, његова комерцијализација и трансфер нове технологије у индустрији*, 13. Међународна конференција Заштите од пожара и експлозије, Нови Сад 2012, стр. 345-354 (М33), ISBN 978-86-6211-037-4.

IV Радови саопштени на домаћим конференцијама

18. Шумарац Д., Хаџиефендић Н., Мијић М.: *Анализа могућности акустичке детекције електричног лука у нисконапонским електричним инсталацијама*, ЕТРАН, Златибор 1999, стр. 78-85 (М63), ISBN 86-80507-29-9.
19. Радаковић З., Хаџиефендић Н.: *Детектор редног електричног лука*, Зборник радова I саветовања у области заштите од пожара, Београд 2008, стр. 123-130 (М63), ISBN 978-86-902601-2-6.
20. Хаџиефендић Н., Радаковић З., Трифуновић Ј.: *Електричне инсталације – чест узрок пожара*, Зборник радова I саветовања у области заштите од пожара, Београд 2008, стр. 111-122 (М63), ISBN 978-86-902601-2-6.
21. Костић М., Хаџиефендић Н., Трифуновић Ј.: *Термовизијска детекција и AFCI уређаји*, Зборник радова II саветовања у области заштите од пожара, Београд 2013, стр. 25-42 (М61), ISBN 978-86-909119-9-8.
22. Костић М., Хаџиефендић Н., Даничић С.: *Заштита објеката од удара грома: стварна ефикасност итапне хватаљке са уређајем за рано стартовање*, Зборник радова III саветовања у области заштите од пожара, Београд 2013, стр. 73-84 (М61), ISBN 978-86-89747-00-3.
23. Хаџиефендић Н., Таталовић А., Давидовић М., Вукајловић В., Трифуновић Ј.: *Могућност унапређења заштите објеката од пожара инсталирањем компоненти за детекцију редног електричног лука*, Зборник радова III саветовања у области заштите од пожара, Београд 2013, стр. 45-66 (М61), ISBN 978-86-89747-00-3.
24. Хаџиефендић Н., Костић Н., Давидовић М., Таталовић А., Зарев И.: *Унапређена методологија за верификацију квалитета нисконапонских*

- електричних инсталација*, Пето стручно саветовање у области заштите од пожара, Београд 2015 (М61).
25. Таталовић А., Давидовић М., Хаџиефендић Н., Костић Н.: *Софтвер за верификацију квалитета нисконапонских електричних инсталација*, Пето стручно саветовање у области заштите од пожара, Београд 2015 (М61).
26. Хаџиефендић Н., Костић Н., Давидовић М.: *Кварови у нисконапонским електричним инсталацијама и њихова детекција употребом савремених заштитних компоненти*, Друга регионална међународна конференција Примењена заштита и њени трендови, Златибор 2015, стр. 205-215 (М33), ISBN 978-86-80048-03-1 .
27. Хаџиефендић Н., Костић Н., Давидовић М.: *Практична искуства настала верификацијом квалитета нисконапонских електричних инсталација са посебним освртом на заштиту од пожара и електричног удара*, Трећа регионална конференција Примењена заштита и њени трендови, Златибор 2016, стр. 155-169 (М63), ISBN 978-86-80048-05-5.
28. Хаџиефендић Н., Давидовић М., Костић Н., Зарев И.: *Пожари на електричним инсталацијама изазвани лошим електричним контактом на прикључцима електроинсталационих компоненти*, Четврта регионална конференција Примењена заштита и њени трендови, Златибор 2017, стр. 178-188 (М63), ISBN 978-86-80048-09-3.
29. Ђенић Н., Зарев И., Костић Н., Хаџиефендић Н., Трифуновић Ј., Живановић Ј.: *Значај могућности раног откривања лоших електричних контаката као могућег узрочника пожара термовизијским прегледом*, Шесто саветовање Управљање ризицима, Пожаревац 2018, стр. 65-80 (М63) ISSN 0354-835X.
30. Хаџиефендић Н., Костић Н., Трифуновић Ј., Давидовић М., Зарев И.: *Пожари узроковани кваровима на електричним инсталацијама – статистички подаци и преглед кварова*, Пета регионална конференција Примењена заштита и њени трендови, Златибор 2018, стр. 48-62 (М63), ISBN 978-86-80048-10-9.

Изјава о ауторству

Име и презиме аутора Неџад Хациефендић

Број индекса (по старом програму је) _____

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Утицај лоших електричних контаката на настанак почетног пожара и метода за њихово откривање у нисконапонским електричним инсталацијама

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис докторанда

У Београду, 18. 3. 2019.

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Нецад Хациефендић

Број индекса (по старом програму је)

Студијски програм Електротехника и рачунарство

Наслов рада Утицај лоших електричних контаката на настанак почетног пожара и метода за њихово откривање у нисконапонским електричним инсталацијама

Ментор проф. др Миомир Костић

Поптисани Нецад Хациефендић

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради похрањена у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис докторанда

У Београду, 18. 3. 2019.

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Утицај лоших електричних контаката на настанак почетног пожара и метода за њихово откривање у нисконапонским електричним инсталацијама

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци.

Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

Потпис докторанда

У Београду, 18. 3. 2019.

1. **Ауторство.** Дозвољава се умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.
2. **Ауторство – некомерцијално.** Дозвољава се умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.
3. **Ауторство – некомерцијално – без прерада.** Дозвољава се умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.
4. **Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима.** Дозвољава се умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.
5. **Ауторство – без прерада.** Дозвољава се умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.
6. **Ауторство – делити под истим условима.** Дозвољава се умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.