

# Istraživanje učinaka oštećenja kotrljajnog ležaja u eksplozivnoj atmosferi

---

**Rumbak, Slavko**

**Doctoral thesis / Disertacija**

**2009**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:506089>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-20**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)





**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**

**ISTRAŽIVANJE UČINAKA OŠTEĆENJA  
KOTRLJAJNOG LEŽAJA U EKSPLOZIVNOJ  
ATMOSFERI**

**DOKTORSKI RAD**

**Slavko Rumbak**

**Zagreb, 2009.**

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

**ISTRAŽIVANJE UČINAKA OŠTEĆENJA  
KOTRLJAJNOG LEŽAJA U EKSPLOZIVNOJ  
ATMOSFERI**

DOKTORSKI RAD

Mentor:  
Prof. dr. sc. Vedran Mudronja

Slavko Rumbak

Zagreb, 2009.

<b>UDK:</b>	614.83:621.82:62-13
<b>Ključne riječi:</b>	kotrljajni kuglični ležaj, eksplozivna atmosfera, uzročnik paljenja, protueksplozijska zaštita, statistička analiza, rotacijska oprema, zaštita opreme i sigurnost ljudi
<b>Znanstveno područje:</b>	TEHNIČKE ZNANOSTI
<b>Znanstveno polje:</b>	STROJARSTVO
<b>Institucija u kojoj je rad izrađen:</b>	Agencija za prostore ugrožene eksplozivnom atmosferom, Ex-Agencija, Zagreb Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu
<b>Mentor rada:</b>	Prof. dr. sc. Vedran Mudronja
<b>Broj stranica:</b>	162
<b>Broj slika:</b>	104
<b>Broj tablica:</b>	65
<b>Broj korištenih bibliografskih jedinica:</b>	143
<b>Datum obrane:</b>	
<b>Povjerenstvo:</b>	<b>Dr. sc. Nikola Šakić</b> , red. prof. Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu - predsjednik <b>Dr. sc. Vedran Mudronja</b> , red. prof. Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu – mentor <b>Dr. sc. Milan Opalić</b> , red. prof. Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu – član <b>Dr. sc. Antun Galović</b> , red. prof. Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu – član <b>Dr. sc. Igor Zorić</b> , izv. prof. Rudarsko geološko naftnog fakulteta u Zagrebu – član
<b>Institucija u kojoj je rad pohranjen:</b>	Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu Nacionalna i sveučilišna knjižnica, Zagreb

*Doktorski rad posvećujem mojim roditeljima*

***Augustinu i Janji***

*za njihovu ljubav, trud i samoodricanje kao i  
za pružanje podrške tijekom cijelog mog  
obrazovnog puta od prvoškolske klupe do  
doktorskog rada.*

## **ZAHVALA**

*Ovim doktorskim radom zaokružuje se jedno lijepo i intenzivno razdoblje u mom životu. Zahvala za pomoć u izradi ovog rada i svemu onom što je njemu prethodilo ide mnogim osobama.*

*Iskrene zahvale prof.dr.sc. Vedranu Mudronji, mojem mentoru, na ukazanom povjerenju, strpljenju i prenesenom znanju kroz sve godine mojeg dodiplomskog i doktorskog studija. Brojni zajednički razgovori i diskusije izbistrili su mi mnoge nedoumice, kako ljudske tako i znanstvene.*

*Zahvaljujem predsjedniku povjerenstva za ocjenu i obranu prof.dr.sc. Nikoli Šakiću na uloženom trudu u cilju terminološkog i stilskeg oblikovanja rada. Članovima povjerenstva za ocjenu teme i rada prof.dr.sc. Antunu Galoviću, prof.dr.sc. Milanu Opaliću i prof.dr.sc. Igoru Zoriću zahvaljujem na dobronamjernim primjedbama i sugestijama usmjerenim na podizanju znanstvene razine rada.*

*Želim se zahvaliti suradnicima u tvrtci u kojoj radim, „Agenciji za prostore ugrožene eksplozivnom atmosferom”, posebno njezinom ravnatelju gosp. Ivanu Renduliću, dipl.oecc. koji mi je podrškom davao podstreh za nastavak i brže dovršenje ovog rada.*

*Iskrene zahvale prof.dr.sc. Nenadu J.J. Marinoviću, na postavljanju temelja te prenesenom stručnom znanju iz protueksplozijske zaštite kroz sve ove godine zajedničkog rada.*

*Zahvalio bih se mojim roditeljima Augustinu i Janji i sestri Mariji za ljubav i povjerenje koje su imali u mene.*

*Na kraju, najveće hvala mojoj supruzi Ivani na njezinoj bezgraničnoj potpori, pomoći, razumijevanju i ljubavi koju mi je pružala tijekom izrade ovog rada.*

*U Zagrebu, ožujak 2009.*

*Slavko Rumbak*

## SADRŽAJ

Predgovor rada	XI
Sažetak	XII
<i>Summary</i>	XIV
Ključne riječi	XVI
<i>Key words</i>	XVI
Popis oznaka	XVII
Popis posebnih kratica i naziva	XIX
Popis slika	XX
Popis tablica	XXVII
<b>1. UVOD</b> .....	1
1.1 Motivacija.....	1
1.2 Pregled dosadašnjih istraživanja .....	2
1.3 Hipoteza rada.....	4
<b>2. PROSTORI UGROŽENI EKSPLOZIVNOM ATMOSFEROM</b> .....	6
2.1 Eksplozivne smjese.....	8
2.2 Eksplozivne smjese plina i zraka.....	10
2.3 Eksplozivne smjese para zapaljivih kapljevina i zraka.....	13
2.4 Eksplozivna smjesa uzvitlane prašine i zraka.....	15
2.5 Minimalna energija i temperatura paljenja.....	19
2.6 Razvrstavanje zapaljivih plinova, para i prašina u odnosu na uređaje.....	22
2.6.1 Razvrstavanje zapaljivih plinova i para prema temperaturi paljenja.....	23
2.6.2 Razvrstavanje zapaljivih plinova i para prema energiji paljenja.....	24
2.6.3 Razvrstavanje zapaljivih prašina.....	24
2.7 Zone opasnosti i klasifikacija prostora.....	25
2.7.1 Izvori ispuštanja zapaljivih tvari .....	27
2.7.2 Svrha klasifikacije prostora.....	28
2.7.3 Klasifikacija prostora sa zapaljivim prašinama.....	30

<b>3. UZROČNICI PALJENJA EKSPLOZIVNE ATMOSFERE.....</b>	<b>32</b>
3.1 Vruće površine kod plinova i para zapaljivih kapljevina.....	32
3.2 Vruće površine kod prašina.....	34
3.3 Raspodjela uzročnika paljenja.....	37
<b>4. KOTRLJAJNI KUGLIČNI LEŽAJ.....</b>	<b>45</b>
4.1 Radijalni kotrljajni kuglični ležaj.....	45
4.2 Prikaz nazivlja u kotrljajnom kugličnom ležaju.....	46
4.3 Učestalost oštećenja u kotrljajnom kugličnom ležaju.....	47
4.4 Oštećenja nastala na dijelovima kotrljajnih ležajeva.....	50
4.5 Zahtjevi na kotrljajne ležajeve u svjetlu današnjih zakonskih i normativnih dokumenata iz protueksplozijske zaštite.....	55
4.5.1 Zahtjevi na ležajeve kod električnih rotacijskih strojeva.....	56
4.5.2 Zahtjevi na ležajeve kod mehaničkih rotacijskih strojeva.....	58
4.6 Temperatura u ležajevima.....	61
4.6.1 Generiranje tarne topline u kotrljajnim kugličnim ležajevima.....	61
4.6.2 Radna temperatura kotrljajnih ležajeva.....	62
4.6.3 Određivanje temperature ležaja.....	62
<b>5. EKSPERIMENTALNI RAD.....</b>	<b>65</b>
5.1 Opis eksperimenta.....	65
5.2 Radno mjesto za provođenje ispitivanja uzoraka ležaja SKF 6206.....	65
5.3 Izrada ispitivanih uzoraka.....	70
5.3.1 Ispitivani uzorci.....	70
5.4 Kriteriji za analizu.....	74
5.4.1 Usporedba rezultata ispitivanja prema temperaturi paljenja plinova i para.....	74
5.4.2 Usporedba rezultata ispitivanja prema temperaturi paljenja oblaka i naslaga (sloja) prašina.....	74
<b>6. PROVEDBA ANALIZE REZULTATA ISPITIVANJA (rezultati ispitivanja,     analiza i diskusija).....</b>	<b>75</b>
6.1 Predviđene analize.....	75
6.2 Podjela temperaturne krivulje za statističku analizu.....	75



6.3	Rezultati mjerenja temperature ispravnog kotrljajnog kugličnog ležaja SKF 6206	77
6.3.1	Rezultati mjerenja temperature ispravnog kotrljajnog kugličnog ležaja SKF 6206 s konstantnim brojem okretaja.....	77
6.3.2	Rezultati mjerenja temperature ispravnog kotrljajnog kugličnog ležaja SKF 6206 s promjenjivim brojem okretaja.....	79
6.4	Rezultati mjerenja temperature u razdoblju početka rada $\mathcal{G}_p$ kotrljajnog kugličnog ležaja SKF 6206 s oštećenjem.....	80
6.4.1	Rezultati mjerenja temperature u razdoblju početka rada $\mathcal{G}_{pv}$ kotrljajnih kugličnih ležajeva s oštećenjem vanjskog prstena.....	81
6.4.2	Rezultati mjerenja temperature u razdoblju početka rada $\mathcal{G}_{pu}$ kotrljajnih kugličnih ležajeva s oštećenjem unutarnjeg prstena.....	82
6.4.3	Rezultati mjerenja temperature u razdoblju početka rada $\mathcal{G}_k$ kotrljajnih kugličnih ležajeva s oštećenjem kaveza.....	83
6.4.4	Usporedba dostizanja stacionarne temperature u razdoblju početka rada ispravnog kotrljajnog kugličnog ležaja i kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem.....	84
6.5	Rezultati mjerenja temperature u stacionarnom radu $\mathcal{G}_s$ kotrljajnog kugličnog ležaja SKF 6206 s oštećenjem.....	84
6.5.1	Rezultati mjerenja temperature u stacionarnom radu $\mathcal{G}_{sv}$ kotrljajnih kugličnih ležajeva s oštećenjem vanjskog prstena.....	84
6.5.2	Rezultati mjerenja temperature u stacionarnom radu $\mathcal{G}_{su}$ kotrljajnih kugličnih ležajeva s oštećenjem unutarnjeg prstena.....	85
6.5.3	Rezultati mjerenja temperature u stacionarnom radu $\mathcal{G}_{sk}$ kotrljajnih kugličnih ležajeva s oštećenjem kaveza.....	86
6.5.4	Usporedba temperatura u razdoblju stacionarnog rada ispravnog kotrljajnog kugličnog ležaja i kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem.....	87
6.6	Rezultati mjerenja vremena i temperature u razdoblju otkazivanja kotrljajnog kugličnog ležaja SKF 6206 s oštećenjem.....	88

6.6.1	Rezultati mjerenja vremena početka otkaza $t_{po}$ , temperature početka otkaza $\mathcal{G}_{po}$ , vremena otkaza (zaribavanja) $t_z$ i temperature zaribavanja $\mathcal{G}_z$ kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem vanjskog prstena.....	88
6.6.1.1	Test normalnosti za vrijeme početka otkaza $t_{po}$ .....	91
6.6.1.2	Test normalnosti za temperaturu početka otkaza $\mathcal{G}_{po}$ .....	91
6.6.1.3	Test normalnosti za vrijeme otkaza (zaribavanja) $t_z$ .....	92
6.6.1.4	Test normalnosti za temperaturu početka otkaza $\mathcal{G}_z$ .....	92
6.6.2	Rezultati mjerenja vremena početka otkaza $t_{po}$ , temperature početka otkaza $\mathcal{G}_{po}$ , vremena otkaza (zaribavanja) $t_z$ i temperature zaribavanja $\mathcal{G}_z$ ležaja s oštećenjem unutarnjeg prstena.....	93
6.6.2.1	Test normalnosti za vrijeme početka otkaza $t_{po}$ .....	95
6.6.2.2	Test normalnosti za temperaturu početka otkaza $\mathcal{G}_{po}$ .....	96
6.6.2.3	Test normalnosti za vrijeme otkaza (zaribavanja) $t_z$ .....	97
6.6.2.4	Test normalnosti za temperaturu otkaza (zaribavanja) $\mathcal{G}_z$ ...	97
6.6.3	Rezultati mjerenja vremena početka otkaza $t_{po}$ , temperature početka otkaza $\mathcal{G}_{po}$ , vremena otkaza (zaribavanja) $t_z$ i temperature zaribavanja $\mathcal{G}_z$ ležaja s oštećenjem kaveza.....	98
6.6.3.1	Test normalnosti za vrijeme početka otkaza $t_{po}$ .....	101
6.6.3.2	Test normalnosti za temperaturu početka otkaza $\mathcal{G}_{po}$ .....	101
6.6.3.3	Test normalnosti za vrijeme otkaza (zaribavanja) $t_z$ .....	102
6.6.3.4	Test normalnosti za temperaturu otkaza (zaribavanja) $\mathcal{G}_z$ .....	102
6.7	Statistička analiza eksperimentalnih podataka.....	101
6.8	Regresijska analiza.....	103
6.8.1	Regresijska analiza podataka ispitivanja ležaja s oštećenjem vanjskog prstena.....	103
6.8.2	Regresijska analiza podataka ispitivanja ležaja s oštećenjem unutarnjeg prstena.....	106

6.8.3	Regresijska analiza podataka ispitivanja ležaja s oštećenjem kaveza.....	108
6.9	Analiza varijance (ANOVA).....	110
6.9.1	Usporedba stacionarnog stanja temperaturne krivulje analizom varijance (ANOVA).....	110
6.9.2	Usporedba bitnih parametara na paljenje eksplozivne atmosfere analizom varijance (ANOVA).....	111
6.9.3	Usporedba vremena početka otkaza $t_{po}$ analizom varijance (ANOVA).....	112
6.9.4	Usporedba temperature početka otkaza $\vartheta_{po}$ analizom varijance (ANOVA).....	113
6.9.5	Usporedba vremena otkaza (zaribavanja) $t_z$ analizom varijance (ANOVA).....	114
6.9.6	Usporedba temperature otkaza (zaribavanja) $\vartheta_z$ analizom varijance (ANOVA).....	115
6.10	Usporedba temperaturne krivulje ispravnog kotrljajnog kugličnog ležaja s promjenom broja okretaja i temperaturnih krivulja kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjima u trenutku otkazivanja.....	116
6.11	Analiza predviđanja.....	117
6.11.1	Analiza predviđanja uzročnika paljenja kod ležaja s oštećenjem vanjskog prstena.....	117
6.11.1.1	<i>Analiza predviđanja temperature kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem vanjskog prstena u ovisnosti o temperaturnim razredima.....</i>	118
6.11.1.2	<i>Analiza predviđanja temperature kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem vanjskog prstena u ovisnosti o temperaturi paljenja oblaka prašine.....</i>	119
6.11.1.3	<i>Analiza predviđanja temperature kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem vanjskog prstena u ovisnosti o temperaturi paljenja sloja prašine.....</i>	120
6.11.2	Analiza predviđanja uzročnika paljenja kod ležaja s oštećenjem unutarnjeg prstena.....	121

6.11.2.1	<i>Analiza predviđanja temperature kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem unutarnjeg prstena u ovisnosti o temperaturnim razredima.....</i>	122
6.11.2.2	<i>Analiza predviđanja temperature kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem unutarnjeg prstena u ovisnosti o temperaturi paljenja oblaka prašine.....</i>	123
6.11.2.3	<i>Analiza predviđanja temperature kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem unutarnjeg prstena u ovisnosti o temperaturi paljenja sloja prašine.....</i>	124
6.11.3	<i>Analiza predviđanja temperature kotrljajnih kugličnih ležajeva s oštećenjem kaveza .....</i>	125
6.11.3.1	<i>Analiza predviđanja temperature kugličnog ležaja s oštećenjem kaveza u ovisnosti o temperaturnim razredima..</i>	126
6.11.3.2	<i>Analiza predviđanja kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem kaveza u ovisnosti o temperaturi paljenja oblaka prašine.....</i>	127
6.11.3.3	<i>Analiza predviđanja temperature kotrljajnog kugličnog ležaja u ovisnosti o temperaturi paljenja sloja prašine.....</i>	128
6.12	<i>Usporedba prediktivnih vremena dostizanja temperaturnih razreda s vremenima početka i vremenom otkaza kotrljajnih kugličnih ležajeva s različitim mjestima oštećenja.....</i>	129
<b>7.</b>	<b>PRIJEDLOG ZAŠTITNOG SUSTAVA KOTRLJAJNOG KUGLIČNOG LEŽAJA U EKSPLOZIVNOJ ATMOSFERI .....</b>	<b>132</b>
7.1	<i>Zahtjevi na sustav za nadzor uzročnika paljenja .....</i>	133
7.2	<i>Sklop s osjetilom kao dio sustava nadzora.....</i>	135
7.3	<i>Načini nadzora kotrljajnih kugličnih ležajeva.....</i>	136
7.3.1	<i>Komunikacijska veza pomoću žičane instalacije između sklopa s osjetilom i nadzornog sustava .....</i>	136
7.3.2	<i>Bežična komunikacijska veza između sklopa s osjetilom i nadzornog sustava.....</i>	138

7.4 Bežične mreže sklopova s osjetilom (eng. <i>Wireless sensor networks</i> - WSN).....	142
7.4.1 Norme za komunikaciju kod bežičnih mreža.....	145
7.5 Zaključni osvrt na prijedlog zaštitnog sustava kotrljajnog kugličnog ležaja.....	147
<b>8. ZAKLJUČAK RADA.....</b>	<b>149</b>
<b>9. LITERATURA.....</b>	<b>153</b>
<b>KRATKI ŽIVOTOPIS.....</b>	<b>XXVIII</b>
<b>SHORT BIOGRAPHY.....</b>	<b>XXIX</b>

## **PREDGOVOR RADA**

S tehnološkim razvojem u suvremenim industrijskim postrojenjima na mnogim se mjestima pojavljuju zapaljive tvari. Zapaljive tvari, bilo da se radi o plinu, pari ili prašini, u određenom omjeru sa zrakom (kisikom) tvore eksplozivnu atmosferu koja se djelovanjem uzročnika paljenja zapaljuje, pri čemu dolazi do eksplozije. U industrijskim postrojenjima u kojima se pojavljuje eksplozivna atmosfera ugrađena je rotacijska oprema, odnosno oprema koja barem u jednom svojem dijelu posjeduje rotaciju i za to koristi kotrljajne kuglične ležajeve.

Toplina kao oblik energije nekog tehničkog sustava može nastati djelovanjem i pretvorbom mehaničke energije u toplinsku. Toplina generirana u opremi, odnosno tehnološkim sustavima, opasna je ako uzrokuje temperature, više od temperature paljenja plinova, para i prašine.

Nažalost, prema dosadašnjim iskustvima, do određenih spoznaja o mogućnosti paljenja eksplozivne atmosfere djelovanjem mehaničkih uzročnika dolazilo se nakon eksplozija. Zapravo su eksplozije postale poticaj za poduzimanje odgovarajućih zaštitnih mjera kako bi se one u budućnosti spriječile.

Zbog globalizacije tržišta i sve oštrijih uvjeta konkurencije, tvrtkama se postavljaju visoke norme poslovanja i ponašanja žele li opstati u poslovnom okruženju, ali i podići razinu sigurnosti kroz protueksplozijsku zaštitu. Iako se danas smatra da je protueksplozijska zaštita zakonski i normativno uređeno područje, ona u praksi pokazuje velike nedostatke. Ti su nedostaci prvenstveno uočljivi u raznim statistikama koje ukazuju na veliku učestalost uzročnika paljenja u eksplozijama nastalim pojavom i djelovanjem mehaničkih (neelektričnih) veličina u dijelovima opreme i uređaja; takvo što je, u svakom pogledu, nerazborito prema zaštiti opreme i zdravlja ljudi koji se nalaze u industrijskim postrojenjima. Potrebno je stalno ukazivati na neophodnost razmatranja svih potencijalnih dijelova opreme u kojima je moguć razvoj uzročnika paljenja. Valja također primijeniti najsuvremenije koncepcije i tehnike zaštitnih mjera kako bi se postigli optimalni sigurnosni i povoljni ekonomski učinci.

## SAŽETAK

Cilj ovoga rada je istraživanje utjecaja oštećenja kotrljajnih kugličnih ležajeva na pojavu uzročnika paljenja eksplozivne atmosfere. Prikazana su oštećenja u kotrljajnim kugličnim ležajevima koja uzrokuju stvaranje djelotvornih uzročnika paljenja eksplozivne atmosfere. Proširene su spoznaje o identificiranju početka pojave uzročnika paljenja eksplozivne atmosfere u kotrljajnim kugličnim ležajevima, u cilju zaštite od eksplozije u industrijskim postrojenjima. Istraživanjem su produbljena saznanja određena današnjim normativnim dokumentima iz protueksplozijske zaštite, vezana za zahtjeve kotrljajnih kugličnih ležajeva.

Prvi dio istraživanja obuhvatio je teorijsko razmatranje značajki eksplozivnih smjesa, razvrstavanje na temperature paljenja kod plinova i para, s osvrtom i na prašine. Prikazani su način i svrha klasifikacije prostora s naslova ispuštanja zapaljivih tvari u tehnološkoj opremi, uz ocjenu eksplozijske ugroženosti te određivanje zona opasnosti. Objašnjeni su uzročnici paljenja eksplozivne atmosfere djelovanjem vrućih površina te je prikazana velika učestalost mehaničkih uzročnika paljenja eksplozivne atmosfere.

Za eksperimentalni dio istraživanja izrađen je ispitni sustav s kotrljajnim kugličnim ležajevima zbog identificiranja razvoja površina kritično visoke temperature kao uzročnika paljenja eksplozivne atmosfere. Ispitni sustav pokretan je elektromotorom s nazivnim brojem okretaja, a u dijelu istraživanja broj okretaja je mijenjan pomoću frekvencijskog pretvarača. Ispitni sustav sastoji od kotrljajnog kugličnog ležaja SKF 6206 na kojemu se provodi ispitivanje, rotacijske mase te ispravnog ležaja. Na kotrljajnim kugličnim ležajevima SKF 6206 izvedena su pojedinačna oštećenja na kavezu te vanjskom i unutarnjem prstenu. Kako bi se postigla što veća točnost u izradi oštećenja, ona su izvedena pomoću erozimata te su podijeljena u tri skupine po 20 komada, ovisno o lokaciji oštećenja unutar kotrljajnog kugličnog ležaja (kavez, vanjski i unutarnji prsten). Na oštećenim kotrljajnim kugličnim ležajevima SKF 6206, na tri su mjesta postavljani temperaturna osjetila (termoparovi) za mjerenje temperature na vanjskom prstenu. Za mjerenje i prikupljanje podataka temperature koristio se uređaj „Fluke – Hydra”. Pomoću ispitnog sustava provedena su mjerenja koja su poslužila boljem razumijevanju nastanka uzročnika paljenja u kotrljajnom kugličnom ležaju. Statističkom analizom dobivenih podataka provedena je raspodjela utjecajnih parametara (temperatura i vrijeme) u funkciji istraživanog oštećenja. Statističkom analizom također se prikazao utjecaj pojedinih oštećenja na vrijeme otkaza (zaribavanja) ležaja SKF 6206.

Razdoblja temperaturnih krivulja koja se statistički analiziraju odvijaju se pri početku rada, pri stacionarnom radu te razdoblju otkazivanja ležaja.

Istraživanjem su prvenstveno obuhvaćeni učinci oštećenja kotrljajnih ležajeva na početak pojave kritično visoke temperature, kao najboljeg pokazatelja uzročnika paljenja eksplozivne atmosfere. Na temelju podataka dobivenih tijekom praćenja temperature na oštećenom kotrljajnom kugličnom ležaju, provedena je analiza prema postavljenim kontrolnim granicama paljenja plinova, para i prašina kao mjerom prije razvoja uzročnika paljenja. Na temelju rezultata iz eksperimentalnog dijela istraživanja, određene su eksponencijalne funkcije krivulja porasta temperature u razdoblju otkazivanja kotrljajnih kugličnih ležajeva. Prediktivnom analizom eksponencijalnih funkcija temperature dobivena su vremena paljenja plinova i para određena temperaturnim razredima, kao i paljenja oblaka i sloja prašine brašna i ugljena.

Opisana je mjera zaštite od pojave uzročnika paljenja u kotrljajnim kugličnim ležajevima. Mjera zaštite očituje se u primjeni bežičnog sklopa s osjetilom ugrađenog u kotrljajnom kugličnom ležaju koji se nalaze u strojnoj i električnoj rotacijskoj opremi u industrijskim postrojenjima s prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom.



## ***SUMMARY***

The aim of this paper is to study the effects of damage to ball bearings as a source of ignition of explosive atmospheres. Illustrated here are damaged ball bearings which create effective sources of ignition of explosive atmospheres. Knowledge is gained on the identification of initial occurrences of ignition sources in ball bearings, for the purpose of implementing explosion protection in industrial plants. Research has advanced discoveries that are determined by today's standards in explosion protection, which are related to the requirements of ball bearings.

The first part of the study involved theoretical analysis of the significance of explosive mixtures, sorting by ignition temperatures of gases and vapor, with regard also to dust. Also shown here are the method and purpose of area classification from the standpoint of flammable media release in technical equipment, with assessment of explosion risk and determination of hazardous area. Sources of ignition created by the effect of hot surfaces are explained, and the high rate of mechanical ignition sources is demonstrated.

For the experimental part of this study, a model was designed with ball bearings to identify the progress of critically-high temperatures as a source of ignition. The model was powered by a motor with rated rpm, and during another part of the study the rpm was altered with the aid of a frequency converter. The test model consists of SKF 6206 ball bearings which were tested, rotating mass and correct bearings. On the SKF 6206 ball bearings routine damage was performed on the squirrel cage, exterior and interior rings. In order to achieve the most accurate simulation of damage possible, abrasives were used and the apparatuses were divided into three groups of 20 units each, depending on the location of damage within the ball bearings (squirrel cage, exterior and interior rings). On the damaged SKF 6206 ball bearings, temperature sensors were positioned in three places to measure the temperature of the exterior ring. A „Fluke – Hydra” apparatus was used to measure and collect temperature data. Through use of the test model the ball bearings were examined as sources of ignition of explosive atmospheres.

Based on statistical analysis of the acquired data, influential parameters (temperature and time) were distributed in the function of damage studied. Statistical analysis also demonstrated the effect of particular damage on the seizure rate of the SKF 6206 ball bearings. The period of the temperature curve that is statistically analyzed takes place before the start of operation, during static operation and during seizure of bearings.

This study primarily involves the effects of damage to ball bearings at the onset of critically-high temperatures, as the best indicator of ignition sources. Based on data acquired during monitoring of temperatures in damaged ball bearings, analysis was performed according to set control limits of ignition of gases, vapor and dust, as a measure before the development of an ignition source. Based on the results in the experimental part of the study, exponential functions of the temperature growth curve were established during the period of ball bearing seizure. Predictive analysis of the exponential functions of temperature provided the ignition rate of gases and vapor determined by temperature class, as well as ignition of clouds and flour and coal dust layers.

Measures of protection against sources of ignition in ball bearings are described.

Protection measures are evident in the application of a wireless sensor switch installed in ball bearings, which are located in mechanical and electrical rotating equipment in industrial plants with hazardous areas.

## **KLJUČNE RIJEČI**

kotrljajni kuglični ležaj, eksplozivna atmosfera, uzročnik paljenja, protueksplozijska zaštita, statistička analiza, rotacijska oprema, analiza predviđanja, zaštita opreme, sigurnost ljudi

## ***KEY WORDS***

ball bearing, explosive atmosphere, ignition source, explosion protection, statistical analysis, rotary equipment, analysis prediction, protection equipment, human security

## POPIS OZNAKA

$\tau$  – induksijsko vrijeme paljenja, min

$C_{st}$  – stehiometrijska koncentracija zapaljive tvari u zraku, %

$T_{pl}$  – temperatura plamišta, °C

$K_{st}$  – brzina porasta tlaka eksplozije „brizanca”, bar (m s<sup>-1</sup>)

$p_{max}$  – najveći ostvareni tlak eksplozije, Pa

$V$  – obujam, m<sup>3</sup>

$T_{ti}$  – temperatura tinjanja, °C

$T_p$  – temperatura paljenja uzvitrane prašine, °C

$T_u$  – temperatura uzročnika paljenja, °C

$E_{min}$  – najmanja energija potrebna za paljenje uzvitrane zapaljive prašine, mJ

$E_u$  – energija uzročnika paljenja, J

$T_{5mm}$  – najniža temperatura tinjanja 5 mm debelog sloja prašine, °C

$u$  – krupnoća zrna, μm

$T_{max}$  – najviša temperatura površine uređaja, °C

$\Phi$  – gubitak snage trenjem, W

$M_f$  – tarni moment, N m

$\omega$  – kutna brzina, rad/s

$n$  – brzina okretaja, min<sup>-1</sup>

$L_{10}$  – nominalni životni vijek ležaja

$\vartheta_b$  – temperatura ležaja, °C

$\vartheta_o$  – okolišna temperatura, °C

$A$  – površina odvođenja topline, m<sup>2</sup>

$K$  – ukupni koeficijent prijenosa topline, W/(m<sup>2</sup> °C)

$r$  – radijus kotrljajnog dodira, m

$F$  – opterećenje ležaja, N

$\mu$  – koeficijent trenja

$\lambda(t)$  – funkcija učestalosti ili intenziteta kvara

$t_{po}$  – vrijeme početka otkaza kotrljajnog kugličnog ležaja, min

$g_{po}$  – temperatura početka otkaza kotrljajnog kugličnog ležaja, °C

$t_z$  – vrijeme otkaza (zaribavanja) kotrljajnog kugličnog ležaja, min

$\mathcal{G}_z$  – temperatura otkaza (zaribavanja) kotrljajnog kugličnog ležaja, °C

$\mathcal{G}_{pv}$  – temperatura u razdoblju početka rada kotrljajnih kugličnih ležajeva s oštećenjem vanjskog prstena, °C

$\mathcal{G}_{pu}$  – temperatura u razdoblju početka rada kotrljajnih kugličnih ležajeva s oštećenjem unutarnjeg prstena, °C

$\mathcal{G}_{pk}$  – temperatura u razdoblju početka rada kotrljajnih kugličnih ležajeva s oštećenjem kaveza, °C

$\mathcal{G}_{sv}$  – temperatura u stacionarnom razdoblju rada kotrljajnih kugličnih ležajeva s oštećenjem vanjskog prstena, °C

$\mathcal{G}_{su}$  – temperatura u stacionarnom razdoblju rada kotrljajnih kugličnih ležajeva s oštećenjem unutarnjeg prstena, °C

$\mathcal{G}_{sk}$  – temperatura u stacionarnom razdoblju rada kotrljajnih kugličnih ležajeva s oštećenjem kaveza, °C

## **POPIS POSEBNIH KRATICA I NAZIVA**

DGE – Donja granica eksplozivnosti  
GGE – Gornja granica eksplozivnosti  
ISO – International Organization for Standardization  
NFPA – National Fire Protection Association  
BS – British Standard  
MESG – Maximum Experimental Safe Gap  
MIC – Minimum Ignition Current  
AIT – Auto Ignition Temperature  
UEL – Upper Explosive Limit  
LEL – Lower Explosive Limit  
ASTM – American Society for Testing and Materials  
IEC – International Electrotechnical Commission  
CENELEC – Comité Européen de Normalisation Electrotechnique  
CEN – Comité Européen de Normalisation  
ATEX – Atmosphères Explosibles  
DSEAR – Dangerous Substances & Explosive Atmospheres Regulations  
Ex – Oznaka protueksplozijski zaštićenih uređaja  
IP – Ingress Protection  
REL – Ručno elektrolučno zavarivanje  
ANOVA – Analysis of Variance  
WSN – Wireless sensor networks  
NIST – National Institute for Standards and Technology  
IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers  
HSE – Health and Safety Executive  
UNP – Ukapljeni naftni plin  
LPG – Liquefied Petroleum Gas  
PAN – Personal Area Network  
FHSS – Frequency Hopping Spread Spectrum  
WSN – Wireless Sensor Networks  
SIL – Safety Integrity Level  
IPL - Ignition protection Level  
MEMS – Micro Electro Mechanical Systems

## POPIS SLIKA

<b>Slike</b>	<b>Opis</b>	<b>Stranica</b>
Slika 2.1	Trokut eksplozije.....	7
Slika 2.2	Granice eksplozivnosti [62].....	8
Slika 2.3	Vremenski tijek procesa eksplozije.....	9
Slika 2.4	Tlak eksplozije u ovisnosti o obujamnoj koncentraciji za nekoliko plinova.....	10
Slika 2.5	Krivulja tlaka eksplozije u vremenu, za smjesu sastavljenu od 10 % metana i 70 % dušika u 20-litarskoj ispitnoj kugli .....	10
Slika 2.6	Granice eksplozivnosti za smjesu metana i zraka.....	11
Slika 2.7	Granice eksplozivnosti za smjesu vodika i zraka.....	11
Slika 2.8	Utjecaj tlaka na promjenu obujamnih granica eksplozivnosti zemnog plina (metana).....	12
Slika 2.9	Utjecaj temperature na promjenu obujamnih granica eksplozivnosti zemnog (prirodnog) plina (metan).....	13
Slika 2.10	Granice i točke eksplozivnosti para zapaljivih kapljevina.....	14
Slika 2.11	Povezanost različitih zapaljivih svojstava (brojčane vrijednosti prikazane su za pare benzina).....	15
Slika 2.12	Granice eksplozivnosti [2].....	16
Slika 2.13	Krivulja tlaka za eksploziju oblaka zapaljive prašine.....	17
Slika 2.14	Vjerojatnosti postojanja eksplozivne atmosfere i uzročnika paljenja u pojedinim zonama opasnosti.....	26
Slika 2.15	Vremenski kriterij za podjelu ugroženog prostora na zone opasnosti u omjeru na učestalost pojave i trajanja eksplozivne atmosfere i uzročnika paljenja.....	30
Slika 3.1	Smanjenje najveće dopuštene temperature površine uređaja u omjeru na povećanje debljine slojeva prašine.....	36
Slika 3.2	Učestalost uzročnika paljenja dobivena na temelju više studija [94].....	40
Slika 3.3	Učestalost kvarova u elektromotoru [10].....	42
Slika 3.4	Struktura učestalosti kvarova elektromotora u industrijskim postrojenjima [100].....	42

Slika 3.5	Učestalost uzročnika paljenja u rudnicima ugljena u periodu od 1992. do 2002. godine [107].....	44
Slika 4.1	Radijalni kotrljajni kuglični ležaj.....	45
Slika 4.2	Glavne mjere u kotrljajnom kugličnom ležaju.....	46
Slika 4.3	Učestalost oštećenja u kotrljajnom kugličnom ležaju [109].....	48
Slika 4.4	Raspodjela kvarova u kotrljajnim ležajevima [110].....	48
Slika 4.5	Učestalost kvarova na unutarnjoj i vanjskoj kotrljajnoj stazi kod kugličnih ležajeva [111] .....	49
Slika 4.6	Prikaz vjerojatnosti nastanka kvara u radnom vijeku kotrljajnog kugličnog ležaja.....	50
Slika 4.7	Točkasto oštećenje nastalo zamorom na unutarnjoj kotrljajnoj stazi kugličnog ležaja [110].....	50
Slika 4.8	Točkasto oštećenje nastalo zamorom na vanjskoj kotrljajnoj stazi koničnog ležaja [110].....	51
Slika 4.9	Razoran prijelom kaveza kotrljajnog ležaja [110].....	52
Slika 4.10	Metalni kavez s udubljenjima [110].....	52
Slika 4.11	Točkasto oštećenje ležaja nastalo prolaskom električne struje [112].....	53
Slika 4.12	Razvoj oštećenja nastalog zamorom materijala na stazi unutarnjeg prstena [110] .....	54
Slika 5.1	Ispitni sustav; 1 – elektromotor, 2 – ispitivani ležaj SKF 6206, 3 – rotacijska masa, 4 – ležajni oslonac.....	65
Slika 5.2	Prikaz radnog mjesta za provođenje ispitivanja kotrljajnih kugličnih ležajeva: 1 – ispitni sustav, 2 – uređaj za pohranjivanje podataka temperature „Hydra–Fluke”, 3 – upravljački stol, 4 – napajanje električnom energijom.....	66
Slika 5.3	Gornji i donji dio kućišta ispitivanog kotrljajnog kugličnog ležaja SKF 6206.....	67
Slika 5.4	Lokacije montaže osjetila temperature (termoparova).....	68
Slika 5.5	Uređaj za pohranjivanje podataka vrijednosti temperature „Fluke – Hydra” s ispitivanog ležaja SKF 6206.....	69
Slika 5.6	Frekvencijski pretvarač Končar tip: konvert midi.....	69
Slika 5.7	Dimenzije oštećenja vanjskog prstena kotrljajnog kugličnog ležaja SKF 6206.....	70



Slika 5.8	Dimenzije oštećenja unutarnjeg prstena kotrljajnog kugličnog ležaja SKF 6206.....	71
Slika 5.9	Dimenzije oštećenja kaveza kotrljajnog kugličnog ležaja SKF 6206....	71
Slika 5.10	Izgled oštećenja vanjskog prstena kotrljajnog kugličnog ležaja SKF 6206.....	72
Slika 5.11	Fotografija oštećenja vanjskog prstena kotrljajnog kugličnog ležaja SKF 6206.....	72
Slika 5.12	Izgled oštećenja unutarnjeg prstena kotrljajnog kugličnog ležaja SKF 6206.....	72
Slika 5.13	Fotografija oštećenja unutarnjeg prstena kotrljajnog kugličnog ležaja SKF 6206.....	73
Slika 5.14	Izgled oštećenja kaveza kotrljajnog kugličnog ležaja SKF 6206.....	73
Slika 5.15	Fotografija oštećenja kaveza kotrljajnog kugličnog ležaja SKF 6206....	73
Slika 6.1	Tipični izgled temperaturne krivulje rada kotrljajnog kugličnog ležaja SFK 6206 s oštećenjem, od trenutka kretanja u rad do trenutka otkaza (zaribavanja).....	76
Slika 6.2	Temperaturna krivulja ispravnog kotrljajnog kugličnog ležaja na 1000 min <sup>-1</sup> .....	77
Slika 6.3	Temperaturna krivulja ispravnog kotrljajnog kugličnog ležaja na 2000 min <sup>-1</sup> .....	78
Slika 6.4	Temperaturna krivulja ispravnog kotrljajnog kugličnog ležaja na 3000 min <sup>-1</sup> .....	79
Slika 6.5	Temperaturna krivulja kotrljajnog kugličnog ležaja SKF 6206 bez oštećenja u ovisnosti o broju okretaja.....	80
Slika 6.6	Prikaz temperaturnih krivulja u razdoblju početka rada kotrljajnih ležajeva s oštećenjem vanjskog prstena.....	81
Slika 6.7	Prikaz temperaturnih krivulja u razdoblju početka rada kotrljajnih ležajeva s oštećenjem unutarnjeg prstena.....	82
Slika 6.8	Prikaz temperaturnih krivulja u razdoblju početka rada kotrljajnih ležajeva s oštećenjem kaveza.....	83
Slika 6.9	Prikaz temperaturnih krivulja u stacionarnom radu kotrljajnih ležajeva s oštećenjem vanjskog prstena.....	85
Slika 6.10	Prikaz temperaturnih krivulja u stacionarnom radu kotrljajnih ležajeva s oštećenjem unutarnjeg prstena.....	86

Slika 6.11	Prikaz temperaturnih krivulja u stacionarnom radu kotrljajnih ležajeva s oštećenjem kaveza.....	87
Slika 6.12	Prikaz temperaturnih krivulja kotrljajnih ležajeva s oštećenjem vanjskog prstena.....	88
Slika 6.13	Vrijeme početka otkaza $t_{po}$ za kotrljajne kuglične ležajeve s oštećenjem vanjskog prstena .....	89
Slika 6.14	Nadtemperatura početka otkaza $\mathcal{G}_{po}$ za kotrljajne kuglične ležajeve s oštećenjem vanjskog prstena .....	89
Slika 6.15	Vrijeme otkaza (zaribavanja) $t_z$ za kotrljajne kuglične ležajeve s oštećenjem vanjskog prstena .....	90
Slika 6.16	Nadtemperatura otkaza (zaribavanja) $\mathcal{G}_z$ za kotrljajne kuglične ležajeve s oštećenjem vanjskog prstena .....	90
Slika 6.17	Prikaz temperaturnih krivulja kotrljajnih ležajeva s oštećenjem unutarnjeg prstena.....	93
Slika 6.18	Vrijeme početka otkaza $t_{po}$ za kotrljajne kuglične ležajeve s oštećenjem unutarnjeg prstena .....	94
Slika 6.19	Nadtemperatura početka otkaza $\mathcal{G}_{po}$ za kotrljajne kuglične ležajeve s oštećenje unutarnjeg prstena .....	94
Slika 6.20	Vrijeme otkaza (zaribavanja) $t_z$ za kotrljajne kuglične ležajeve s oštećenjem unutarnjeg prstena.....	95
Slika 6.21	Nadtemperatura otkaza (zaribavanja) $\mathcal{G}_z$ za kotrljajne kuglične ležajeve s oštećenjem unutarnjeg prstena.....	95
Slika 6.22	Prikaz temperaturnih krivulja kotrljajnih kugličnih ležajeva s oštećenjem kaveza.....	98
Slika 6.23	Vrijeme početka otkaza $t_{po}$ za kotrljajne kuglične ležajeve s oštećenjem kaveza.....	99
Slika 6.24	Nadtemperatura početka otkaza $\mathcal{G}_{po}$ za ispitne ležajeve s oštećenjem kaveza.....	99
Slika 6.25	Vrijeme otkaza (zaribavanja) $t_z$ za ispitne ležajeve s oštećenjem kaveza.....	100

Slika 6.26	Nadtemperatura otkaza (zaribavanja) $\mathcal{G}_z$ za ispitne ležajeve s oštećenjem kaveza.....	100
Slika 6.27	Eksponecijalna regresija nadtemperature kod kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem vanjskog prstena.....	104
Slika 6.28	Prikaz normalnosti ostataka eksponecijalne regresije temperature $\mathcal{G}_{vp}$ kod kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem vanjskog prstena.....	105
Slika 6.29	Eksponecijalna regresija nadtemperature $\mathcal{G}_{up}$ kod kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem unutarnjeg prstena.....	106
Slika 6.30	Prikaz normalnosti ostataka eksponecijalne regresije temperature $\mathcal{G}_{up}$ kod kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem unutarnjeg prstena.....	107
Slika 6.31	Eksponecijalna regresija nadtemperature $\mathcal{G}_k$ kod kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem kaveza .....	108
Slika 6.32	Prikaz normalnosti ostataka eksponecijalne regresije temperature $\mathcal{G}_k$ kod kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem kaveza.....	109
Slika 6.33	Usporedba nadtemperatura u stacionarnom stanju $\mathcal{G}_s$ kotrljajnog kugličnog ležaja u ovisnosti o mjestu oštećenja.....	111
Slika 6.34	Usporedba vremena početka otkaza $t_{po}$ kotrljajnog kugličnog ležaja u ovisnosti o mjestu oštećenja.....	112
Slika 6.35	Usporedba nadtemperature početka otkaza $\mathcal{G}_{po}$ kotrljajnog kugličnog ležaja u ovisnosti o mjestu oštećenja.....	113
Slika 6.36	Usporedba vremena otkaza (zaribavanja) $t_z$ kotrljajnog kugličnog ležaja u ovisnosti o mjestu oštećenja.....	114
Slika 6.37	Usporedba nadtemperature otkaza (zaribavanja) $\mathcal{G}_z$ kotrljajnog kugličnog ležaja u ovisnosti o mjestu oštećenja.....	115
Slika 6.38	Usporedba temperaturne krivulje ispravnog kotrljajnog kugličnog ležaja s povećanjem broja okretaja i kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjima.....	116
Slika 6.39	Predikcija vremena dostizanja temperatura pojedinih temperaturnih razreda kod kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem vanjskog prstena.....	118

Slika 6.40	Predikcija vremena dostizanja temperatura paljenja oblaka zapaljive prašine kod kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem vanjskog prstena.....	119
Slika 6.41	Predikcija vremena dostizanja temperatura paljenja sloja zapaljive prašine kod kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem vanjskog prstena.....	120
Slika 6.42	Predikcija vremena dostizanja temperatura pojedinih temperaturnih razreda kod kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem unutarnjeg prstena.....	122
Slika 6.43	Predikcija vremena dostizanja temperatura paljenja oblaka zapaljive prašine kod kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem unutarnjeg prstena.....	123
Slika 6.44	Predikcija vremena dostizanja temperatura paljenja sloja zapaljive prašine kod kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem unutarnjeg prstena.....	124
Slika 6.45	Predikcija vremena dostizanja temperatura pojedinih temperaturnih razreda kod kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem kaveza.....	126
Slika 6.46	Predikcija vremena dostizanja temperatura paljenja oblaka zapaljive prašine kod kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem kaveza.....	127
Slika 6.47	Predikcija vremena dostizanja temperatura paljenja sloja zapaljive prašine kod kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem kaveza.....	128
Slika 7.1	Komponente sklopa s osjetilom .....	135
Slika 7.2	Shematski prikaz nadzora temperature kotrljajnih kugličnih ležajeva pomoću žičane veze koja povezuje sklop s osjetilom u opremi i sustav nadzora.....	136
Slika 7.3	a) Sklop s osjetilom sa žičanom vezom [137] b) temperaturno osjetilo (sa žicom) ugrađen u ležajni sklop.....	137
Slika 7.4	Presjek ležajnog sklopa elektromotora s prikazom ugradnje temperaturnog osjetila koji posjeduje žičanu vezu i priključak („konektor”) [137].....	137
Slika 7.5	Sklopovi s osjetilima nadzora temperature kotrljajnog kugličnog ležaja ugrađeni u strojnoj rotacijskoj opremi (crpki).....	138
Slika 7.6	Sklopovi s osjetilima sa Sveučilišta Kalifornije u Berkeleyu.....	139

Slika 7.7	Primjeri sklopova s osjetilima nazivom proizvođača.....	140
Slika 7.8	Primjer mjesta ugradnje bežičnog osjetila u kotrljajnom kugličnom ležaju [139].....	141
Slika 7.9	Bežični sklop s osjetilom u kotrljajnom kugličnom ležaju [141].....	142
Slika 7.10	Shematski prikaz nadzora temperature kotrljajnih kugličnih ležajeva pomoću bežične (eng. <i>wireless</i> ) veze između sklopa s osjetilom i sustava nadzora.....	143

## POPIS TABLICA

<b>Tablica</b>	<b>Opis</b>	<b>Stranica</b>
Tablica 2.1	Brzine širenja plamena i pretlak za različite procese gorenja.....	6
Tablica 2.2	Najmanje energije paljenja eksplozivnih smjesa plinova i para sa zrakom [2].....	20
Tablica 2.3	Temperature paljenja oblaka i sloja nekih učestalih zapaljivih prašina.....	20
Tablica 2.4	Najmanja energija paljenja $E_{min}$ (za nekoliko učestalih ugljikovodika).....	21
Tablica 2.5	Temperature paljenja nekoliko plinova prema HRN IEC TR 60079-20 [76].....	22
Tablica 2.6	Razvrstavanje dozvoljenog zagrijavanja uređaja u temperaturne razrede.....	23
Tablica 2.7	Usporedba temperaturnih razreda na nacionalnoj (Japan, SAD) i internacionalnoj praksi (IEC; CEN; CENELEC) [112].....	23
Tablica 2.8	Skupine plinova i para prema MESR.....	24
Tablica 2.9	Podjela zapaljivih prašina prema brzini prirasta tlaka eksplozije.....	25
Tablica 2.10	Vjerojatnost postojanja eksplozivne atmosfere i uzročnika paljenja.....	27
Tablica 3.1	Ovisnost brzine strujanja zapaljive tvari (plina) o temperaturi površine dostatne za paljenja.....	33
Tablica 3.2	Temperature paljenja oblaka za različite vrste prašine u °C.....	37
Tablica 3.3	Temperature paljenja tinjanja sloja za različite vrste prašine u °C.....	36
Tablica 3.4	Učestalost uzročnika paljenja u eksplozijama [89].....	36
Tablica 3.5	Uzročnici paljenja za eksplozije zapaljivih prašina prema HSE od 1979. do 1988. godine [90].....	36
Tablica 3.6	Učestalost uzročnika paljenja u eksplozijama [91].....	36
Tablica 3.7	Učestalost uzročnika paljenja [92].....	36
Tablica 3.8	Učestalost uzroka nesreća (sa uzročnicima paljenja) u Meksičkom zaljevu [93].....	36
Tablica 3.9	Učestalosti uzročnika paljenja u procesnom i neprocesnom postrojenju [95].....	39

Tablica 3.10	Raspodjela uzročnika paljenja u procesnim postrojenjima na kopnu [95].....	40
Tablica 3.11	Raspodjela uzročnika paljenja u procesnim postrojenjima na moru [95].....	40
Tablica 3.12	Učestalost uzročnika paljenja (1988. do 1997.) nakon identificiranja uzročnika u 91 % od 129 eksplozija prašine [15].....	43
Tablica 3.13	Učestalost uzročnika paljenja u 426 eksplozija prašine u Saveznoj Republici Njemačkoj [12] .....	43
Tablica 3.14	Učestalost uzročnika paljenja u eksplozijama zapaljive prašine u Saveznoj Republici Njemačkoj [104,105].....	43
Tablica 3.15	Učestalost uzročnika paljenja u Velikoj Britaniji od 1979. do 1988. godine [106].....	43
Tablica 4.1	Različite skupine i kategorije opreme u skladu s izvedbom zaštite i uvjetima.....	56
Tablica 5.1	Nazivni podaci elektromotora „Končar-MES” .....	66
Tablica 5.2	Dimenzije kotrljajnog kugličnog ležaja SKF 6206.....	70
Tablica 6.1	Normalna razdioba vremena početka otkaza $t_{po}$ za kotrljajne kuglične ležajeve s oštećenjem vanjskog prstena.....	91
Tablica 6.2	Normalna razdioba temperature početka otkaza $\mathcal{G}_{po}$ za kotrljajne kuglične ležajeve s oštećenjem vanjskog prstena.....	91
Tablica 6.3	Normalna razdioba vremena otkaza (zaribavanja) $t_z$ za kotrljajne kuglične ležajeve s oštećenjem vanjskog prstena.....	92
Tablica 6.4	Normalna razdioba temperature otkaza (zaribavanja) $\mathcal{G}_z$ za kotrljajne kuglične ležajeve s oštećenjem vanjskog prstena.....	92
Tablica 6.5	Normalna razdioba vremena početka otkaza $t_{po}$ za kotrljajne kuglične ležajeve s oštećenjem unutrašnjeg prstena.....	96
Tablica 6.6	Normalna razdioba temperature početka otkaza $\mathcal{G}_{po}$ za kotrljajne kuglične ležajeve s oštećenjem unutrašnjeg prstena.....	96
Tablica 6.7	Normalna razdioba vremena otkaza (zaribavanja) $t_z$ za kotrljajne kuglične ležajeve s oštećenjem unutrašnjeg prstena.....	97

---

---

Tablica 6.8	Normalna razdioba temperature otkaza (zaribavanja) $\mathcal{G}_z$ za kotrljajne kuglične ležajeve s oštećenjem unutrašnjeg prstena.....	97
Tablica 6.9	Normalna razdioba vremena početka otkaza $t_{po}$ za kotrljajne kuglične ležajeve s oštećenjem kaveza.....	101
Tablica 6.10	Normalna razdioba temperature početka otkaza $\mathcal{G}_{po}$ za kotrljajne kuglične ležajeve s oštećenjem kaveza.....	101
Tablica 6.11	Normalna razdioba vremena otkaza (zaribavanja) $t_z$ za kotrljajne kuglične ležajeve s oštećenjem kaveza.....	102
Tablica 6.12	Normalna razdioba temperature otkaza (zaribavanja) $\mathcal{G}_z$ za kotrljajne kuglične ležajeve s oštećenjem kaveza.....	102
Tablica 6.13	Parametri eksponencijalne jednadžbe temperature krivulje kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem vanjskog prstena.....	105
Tablica 6.14	Analiza varijance za parametar temperaturu $\mathcal{G}_{vp}$ kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem vanjskog prstena.....	105
Tablica 6.15	Parametri eksponencijalne jednadžbe temperature krivulje kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem unutarnjeg prstena.....	107
Tablica 6.16	Analiza varijance za parametar temperaturu $\mathcal{G}_{up}$ kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem unutarnjeg prstena.....	107
Tablica 6.17	Parametri eksponencijalne jednadžbe temperature krivulje kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem kaveza.....	109
Tablica 6.18	Analiza varijance za parametar temperaturu $\mathcal{G}_k$ kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem kaveza.....	109
Tablica 6.19	Analiza varijance za stacionarno stanje kotrljajnog kugličnog ležaja.....	110
Tablica 6.20	Tablica usporedbi statističkih parametara za različite mjesta oštećenja.....	111
Tablica 6.21	Analiza varijance za vrijeme početka otkaza $t_{po}$ .....	112
Tablica 6.22	Analiza varijance za temperature početka otkaza $\mathcal{G}_{po}$ .....	113
Tablica 6.23	Analiza varijance za vrijeme otkaza (zaribavanja) $t_z$ .....	114
Tablica 6.24	Analiza varijance za temperature otkaza (zaribavanja) $\mathcal{G}_z$ .....	115



Tablica 6.25	Vrijeme dostizanja temperature pojedinog temperaturnog razreda kod kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem vanjskog prstena.....	119
Tablica 6.26	Vrijeme dostizanja temperature paljenja oblaka zapaljive prašine kod kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem vanjskog prstena.....	120
Tablica 6.27	Vrijeme dostizanja temperature paljenja sloja zapaljive prašine kod kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem vanjskog prstena.....	121
Tablica 6.28	Vrijeme dostizanja temperature pojedinih temperaturnih razreda kod kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem unutarnjeg prstena.....	123
Tablica 6.29	Vrijeme dostizanja temperature paljenja oblaka zapaljive prašine kod kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem unutarnjeg prstena.....	124
Tablica 6.30	Vrijeme dostizanja temperature paljenja sloja zapaljive prašine kod kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem unutarnjeg prstena.....	125
Tablica 6.31	Vrijeme dostizanja temperature pojedinih temperaturnih razreda kod kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem kaveza.....	127
Tablica 6.32	Vrijeme dostizanja temperature paljenja oblaka zapaljive prašine kod kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem kaveza.....	128
Tablica 6.33	Vrijeme dostizanja temperature paljenja sloja zapaljive prašine kod kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem kaveza.....	129
Tablica 6.34	Prediktivno vrijeme $t_{pred}$ dostizanja temperature temperaturnih razreda u kotrljajnim kugličnim ležajevima s različitim oštećenjima..	129
Tablica 6.35	Prediktivno vrijeme $t_{pred}$ dostizanja temperature paljenja oblaka zapaljive prašine, vrijeme početka otkaza $t_{po}$ i vrijeme otkaza (zaribavanja) $t_z$ .....	130
Tablica 6.36	Prediktivno vrijeme $t_{pred}$ dostizanja temperature paljenja sloja zapaljive prašine, vrijeme početka otkaza $t_{po}$ i vrijeme otkaza (zaribavanja) $t_z$ .....	130
Tablica 7.1	Usporedba bežičnih tehnika.....	147

## 1. UVOD

### 1.1 Motivacija

Jedni od najvažnijih zahtjeva u današnjim tehnološkim sustavima u industriji jesu sigurnost ljudi i zaštita opreme. Razvojem tehnologije pojavile su se mnoge opasnosti u ljudskom okolišu, među kojima je svakako i eksplozivna atmosfera.

Eksplozivnom atmosferom smatramo smjesu zapaljive tvari u obliku plina, pare, maglice ili prašine sa zrakom u atmosferskim uvjetima, u kojoj se nakon paljenja izgaranje širi čitavom nepotrošenom smjesom [1]. Drugim riječima, to je pojava pri kojoj se koncentracija zapaljivog medija nalazi između donje i gornje granice eksplozivnosti [2]. Prostor ugrožen eksplozivnom atmosferom ne mora uvijek sadržavati eksplozivnu atmosferu, no već i sama mogućnost njezine pojave navodi nas na oprez te zahtijeva da prostor proglasimo ugroženim. Ugroženost pojedinih prostora od pojave eksplozivne atmosfere klasificira se u zone opasnosti od plinova i para (zona 0, zona 1 i zona 2) [1] te od prašina (zona 20, zona 21 i zona 22) [3].

U zonama opasnosti posebnu pažnju moramo posvetiti uređajima i opremi kao potencijalnim uzročnicima paljenja prisutne eksplozivne atmosfere. Uređaji i oprema moraju biti izrađeni tako da ne uzrokuju inicijalno paljenje eksplozivne atmosfere, odnosno moraju biti u protueksplozijski zaštićenoj izvedbi. Zahtjevi protueksplozijske zaštite opreme i uređaja u prvome redu ovise o vrsti zone opasnosti, tj. značajkama zapaljivih tvari.

U današnjim se industrijskim postrojenjima ne posvećuje dovoljna pozornost uzročnicima paljenja koji nastaju kao posljedica mehaničkog oštećenja, što je nerazborito prema sigurnosti ljudi. Postoji određeni raskorak između oskudnih zahtjeva normativnih dokumenata koji se odnose na rotacijsku opremu i česte pojave oštećenja koja dovode do paljenja eksplozivne atmosfere. Sukladno tome, pojavljuje se potreba za sagledavanjem svih uzročnika paljenja.

Strojna rotacijska oprema sačinjava veći dio cjelokupne opreme u industriji. Takva se oprema u velikom broju instalira u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom, kao što su rafinerijska postrojenja, plinske platforme, petrokemijska industrija, silosi, termoelektrane, kemijska i farmaceutska industrija i sl. Kvarovi i oštećenja u strojnoj opremi mogu izazvati velike materijalne štete s mogućim katastrofalnim posljedicama za zdravlje i sigurnost ljudi. Različiti elementi u strojnoj opremi i uređajima koji se nalaze u eksplozivnoj atmosferi čine potencijalne uzročnike paljenja i to djelovanjem vrućih površina, mehaničkih iskri, vrućih čestica i drugog [4, 5]. Mehaničko trenje i udari s učestalošću od 30 % do 50 % djeluju kao

najznačajniji uzročnici paljenja eksplozivne plinske atmosfere u industriji [6,7,8,9]. Istodobno, kotrljajni ležajevi kao pojedinačni elementi u rotacijskoj opremi po učestalosti oštećenja sudjeluju sa 41 %, a prema nekim izvorima i s više od 50 % [8,10,11].

U eksplozivnoj atmosferi prašina mehanički uzročnici paljenja čine od 33 % do 65 % svih uzročnika paljenja [12-14]. U eksplozivnoj atmosferi prašina ležaj je nakon plamena drugi najznačajniji uzročnik paljenja [15].

Usprkos tome, današnji normativni dokumenti vezani za protueksplozijsku izvedbu rotacijskih strojeva ne poklanjaju dovoljnu pozornost ležajevima kao mogućim uzročnicima paljenja eksplozivne atmosfere [16-18].

Pregledom literature može se primijetiti nedostatak eksperimentalnih rezultata vezanih za nadzor temperature kod kotrljajnih kugličnih ležajeva u svrhu identificiranja uzročnika paljenja eksplozivne atmosfere.

## 1.2 Pregled dosadašnjih istraživanja

Početak prošloga stoljeća, nakon pojave prvih eksplozija u rudnicima, poduzete su prve mjere zaštite od eksplozije. One su se prvenstveno odnosile na zaštitu od paljenja janskog plina (metana) i ugljene prašine. U svojim počecima, zaštita od eksplozije prepoznata je isključivo kao mjera zaštite djelovanjem električne opreme. Kao posljedica toga, u normizacijskim tijelima uslijedio je razvoj normativnih dokumenata vezanih za električnu opremu. Strojna je oprema pritom bila neopravdano izostavljena sa stajališta protueksplozijske zaštite.

Prva istraživanja paljenja zapaljive prašine provedena su prije 130 godina [19]. Iako se u prošlosti smatrala konstantom, najmanja temperatura paljenja zapaljive prašine vrućom površinom značajno se razlikuje u ovisnosti o karakteristikama prašine kao i geometrije vruće površine [20]. Sličnost temperature paljenja različitih oblika naslaga prašina ukazuje na široku mogućnost primjene jednostavnih testova za mjerenje temperature paljenja u prostorima sa zapaljivom prašinom [5,21].

U nekim postrojenjima, uslijed primijenjene tehnologije prisutna je eksplozivna atmosfera u obliku prašine (npr. kod termoenergetskih postrojenja – ugljena prašina; kod prehrambene industrije – brašno, šećer, žitarice itd.), češće nataložene, a rjeđe uzvitlane u zatvorenoj tehnološkoj opremi. Neophodno je razumijevanje svojstava prašina koje se koriste u postrojenju jer paljenje zapaljive prašine ima drugačiji karakter od paljenja eksplozivnih plinova i para te stoga zahtijeva i različitu zaštitu od eksplozije [20,22-27].

Određeni radovi navode pojavu površina kritično visokih temperatura u ležajevima koje djeluju kao uzročnici paljenja eksplozivne atmosfere razvojem vruće površine [28]. U normativnim dokumentima vezanim za protueksplozijsku izvedbu rotacijske opreme navedeni su vrlo oskudni zahtjevi za ležajeve [18,29-31].

U dosadašnjim istraživanjima i literaturi razvijeno je nekoliko metoda identifikacije oštećenja i vrste klasifikacije oštećenja u ležajevima. Na temelju dobivenih informacija, metode dijagnostike oštećenja ležajeva osnovno se dijele na vibracijski nadzor [32-35], obradu akustičkog signala [32,36], analizu maziva [37], mjerenje temperature [38] te analizu električne struje [39].

Nadalje, određeni radovi istražuju lokalna oštećenja tehnikama vezanim za vibracijske parametre [35,40].

Kroz dosadašnja istraživanja lokalnih oštećenja u ležajevima, u velikoj mjeri razmatrane su metode vibracijskog i akustičnog mjerenja. Za proučavanje njihova vibracijskog odziva prihvaćena su dva općenita pristupa. Prvi je rad ležajeva s oštećenjem i nadzor promjena u odzivu vibracija [41-43]. Uobičajeno se oštećenje ubrzava preopterećenjem, većim brojem okretaja ili umanjenom količinom maziva [41,42]. Drugi je pristup namjerno unošenje oštećenja u ležajeve; npr. nagrivanjem kiselinom, erozijom i mehaničkim grebanjem te mjerenje vibracijskog odziva i usporedba s ispravnim ležajevima [44-46]. Akustični odziv ležajeva s oštećenjima razmatran je u nekoliko studija, također kroz dva pristupa: prvi je ispitivanje životnog vijeka ležaja [47], a drugi ispitivanje simuliranih oštećenja [48].

Akustični odziv u kotrljajnim ležajevima razmatran je i kroz istraživanja onečišćenja maziva [36]. Onečišćenje ležajeva i analiza čestica trošenja proučavani su i tehnikom nadzora stanja vibracija [49].

U dosadašnjim radovima razmatran je nadzor ležaja kao jedan od načina funkcionalnog nadzora kvara i poremećaja, odnosno održavanja radnog stanja opreme [50-54]. No istraživanja kotrljajnih kugličnih ležajeva rotacijskih strojeva s ciljem smanjivanja utjecaja te eliminiranja uzročnika paljenja eksplozivne atmosfere nisu provedena ili su oskudno dokumentirana.

Današnja se protueksplozijska zaštita u industrijskim postrojenjima temelji na primjeni posebno projektiranih uređaja [29,31,55,56] ili uporabi specijalnih osjetila za nadzor parametara kod uređaja i opreme [18,57]. Zaštita od nastanka eksplozije u Europi (i u Republici Hrvatskoj) temelji se na Europskim („Atex“) direktivama i odgovarajućim normativnim dokumentima koji uređuju područje protueksplozijske zaštite [58-61].

Usprkos visokoj pravno-normativnoj uređenosti toga područja, današnja koncepcija protueksplozijske zaštite u praktičnoj primjeni pokazuje određene slabosti i nedostatke. Identifikacija uzročnika paljenja mogla bi biti od osobita značaja kod „malih” uređaja i opreme, čija oštećenja nisu financijski značajna, a mogu djelovati kao uzročnici paljenja. Nadzor mogućih oštećenja kotrljajnih kugličnih ležajeva posebno je važno provoditi i na strojevima koji u sklopu nekog tehnološkog procesa nemaju rezervu, tj. neće ih zamijeniti drugi stroj ako dođe do njihova oštećenja i kvara. Neki od tih strojeva, npr. ventilatori, sudjeluju i u sustavu razrjeđivanja eksplozivne atmosfere.

Ispunjenjem zahtjeva normativnih dokumenata vezanih za zaštitu od paljenja eksplozivne atmosfere rotacijske opreme ne pridaje se dovoljna pozornost ležajevima kao uzročnicima paljenja.

### 1.3 Hipoteza

Oštećenja na unutarnjem i vanjskom prstenu te kavezu kotrljajnog kugličnog ležaja potencijalni su uzročnici paljenja eksplozivne atmosfere. Oštećenja se mogu pojaviti zbog tehnološke i eksploatacijske okoliša (npr. prašina, upadi krhotina, čađa i dr.) ili zbog gubitaka mehaničkog stanja (npr. dotrajalosti ležaja, pogrešaka u materijalu, povećanja zračnosti, nedostatka maziva i dr.).

Pojedinačna je oštećenja u kotrljajnom kugličnom ležaju moguće identificirati i pratiti nadzorom temperature. Na temelju podataka dobivenih prilikom praćenja temperature na oštećenim kotrljajnim ležajevima, moguće je identificirati pojavu uzročnika paljenja te primjenom zaštitnog sustava prekinuti rad prije nastanka eksplozije.

Kod različitih se oštećenja u kotrljajnom kugličnom ležaju raspodjela temperature i vrijeme otkaza značajno razlikuju.

Temperaturne krivulje koje nastaju prilikom otkaza kotrljajnog kugličnog ležaja moguće je zadovoljavajuće aproksimirati poznatim matematičkim funkcijama. Na temelju definiranih matematičkih funkcija, moguće je procijeniti vrijeme do pojave uzročnika paljenja eksplozivne atmosfere.

Oštećenje na unutarnjem prstenu kugličnog ležaja djeluje kao najučinkovitiji uzročnik paljenja eksplozivne atmosfere.

Lokacija oštećenja u kotrljajnom kugličnom ležaju utječe na vrijeme početka razvoja uzročnika paljenja eksplozivne atmosfere.

Primjenom sustava identifikacije i nadzora temperature kugličnih kotrljajnih ležajeva moguće je postići višu razinu zaštite od paljenja eksplozivne atmosfere, tj. povećanje sigurnosti opreme i zaštite ljudi.

Praćenjem temperature za vrijeme uporabe kotrljajnog kugličnog ležaja u prostoru s eksplozivnom atmosferom klasificiranom u zoni 1/21 i zoni 2/22, moguće je postići višu razinu sigurnosti nego što to zahtijevaju normativni dokumenti i dosadašnji zahtjevi protueksplozijske zaštite.

## 2. PROSTORI UGROŽENI EKSPLOZIVNOM ATMOSFEROM

U obradi sirovina, poluproizvoda i gotovih proizvoda pojavljuju se zapaljive tvari koje se u određenih fazama obrade ili skladištenja miješaju s okolnim zrakom, tj. dovoljnom količinom kisika i na taj način tvore eksplozivnu atmosferu. Pojavu eksplozivne atmosfere u industriji u normalnom radu ili zbog kvara pojedine tehnološke opreme vrlo je teško spriječiti, a time i pojavu eksplozivne atmosfere.

Zapaljiva tvar uz prisutnost zraka, tj. dovoljne količine kisika može dovesti do procesa gorenja. U prostorima u kojima se nalazi eksplozivna atmosfera može doći do lančane reakcije gorenja, koja zbog svojeg brizantnog razvijanja prelazi u eksploziju. Uz obilniju prisutnost kisika u određenim okolnostima može doći do vrlo brizantne lančane i pojačane reakcije gorenja, što dovodi do procesa detonacije (tablica 2.1) [2].

**Tablica 2.1** Brzine širenja plamena i pretlak za različite procese gorenja

Proces gorenja	Brzina širenja plamena, m/s	Pretlak, MPa
buktanje	do 2	–
eksplozija	2 – 30	0,2 – 1
detonacija	1000 – 4000	1 – 10

U radnim se prostorima u prvome redu treba provoditi zaštita od eksplozivne atmosfere; odgovarajuću mjeru zaštite valja osigurati jer se time rješava i problem zapaljivosti.

Slučaj detonacije potrebno je razmatrati samo zbog eliminiranja takve pojave jer je detonacija kao pojava moguća jedino u iznimnim okolnostima, a zaštita ne bi bila ekonomski opravdana. Pojam „eksplozivna smjesa” češće se koristi u laboratorijima, prilikom namjernog miješanja zapaljivih tvari i zraka u svrhu ispitivanja, dok se pojam „eksplozivna atmosfera” koristi u industrijskim postrojenjima.

Prostor ugrožen eksplozivnom atmosferom ne mora uvijek sadržavati eksplozivnu atmosferu, no već nas i sama mogućnost njezine pojave navodi na oprez i zahtijeva da prostor proglasimo ugroženim. Ugroženost pojedinih prostora od pojave eksplozivne atmosfere klasificira se u zone opasnosti od plinova i para (zona 0, zona 1 i zona 2) [22] te od prašina (zona 20, zona 21 i zona 22) [3].

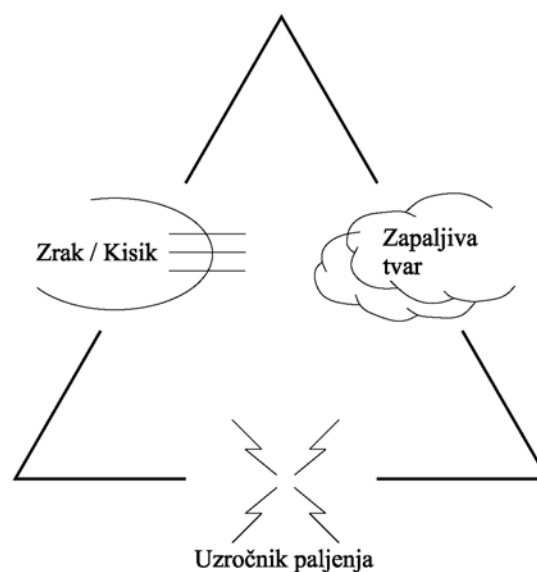
Ovisno o određenim značajkama primjene, prostore s eksplozivnom atmosferom dijelimo u dva bitna područja:

- 1) podzemni rudnici i
- 2) industrija (sva ostala mjesta osim rudnika).

U rudnicima se, u pravilu, pojavljuje samo zapaljivi jamski plin (>90 % metan) koji u smjesi sa zrakom može tvoriti eksplozivnu atmosferu. Osim toga, velika količina uzvitlane ugljene prašine također tvori eksplozivnu atmosferu. U podzemnim rudnicima vrlo često može doći do kombinacije eksplozivnih atmosfera, plina i prašine, bilo da se pojavljuju istodobno ili sukcesivno, jedna kao posljedica druge. Ako npr. dođe do eksplozije metana, vrlo je vjerojatno da će doći i do uzvitlavanja ugljene prašine koja će eksplozijom metana biti zapaljena te će se proširiti u eksploziju ugljene prašine. U protueksplozijskoj zaštiti opreme i uređaja za rudnike potrebno je voditi brigu o nizu čimbenika kao što su mehanička oštećenja, klimatski uvjeti, posebno rukovanje, zapaljivi plinovi u kombinaciji s prašinom itd. No u rudnicima postoji i olakšavajuća okolnost, a to je da se redovito javlja samo eksplozivna atmosfera jamskog plina i zraka, koja se uglavnom sastoji od smjese metana i zraka.

Kako bi došlo do eksplozije, mora se ispuniti uvjet da se u određenom prostoru istovremeno pojave:

- a) zapaljiva tvar,
- b) zrak s minimalnom koncentracijom kisika i
- c) uzročnik paljenja.



**Slika 2.1** Trokut eksplozije



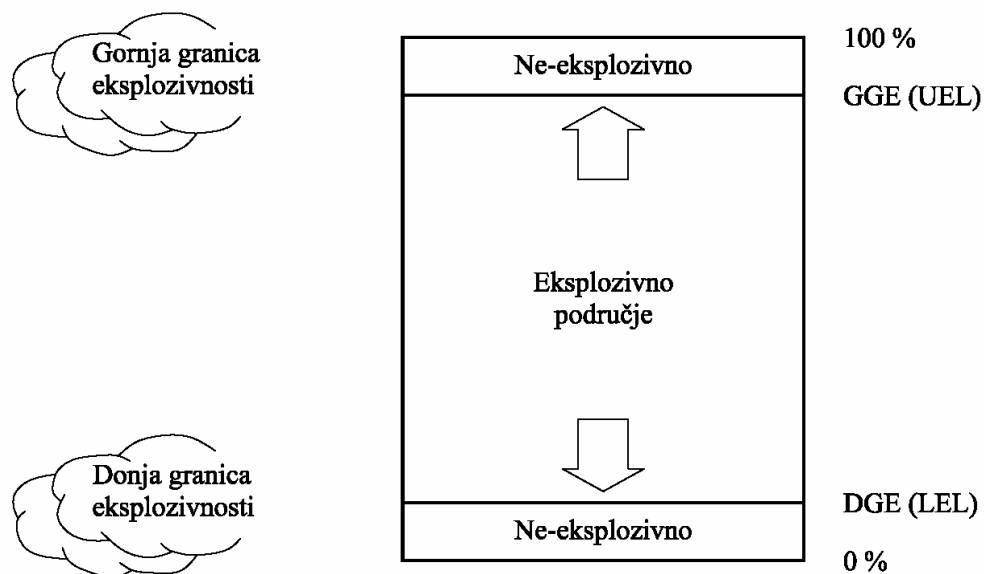
## 2.1 Eksplozivne atmosfere

Industrijskim postrojenjima koja u procesu koriste zapaljive tvari ili gdje one nastaju u radnom procesu, potrebni su osobito visoki sigurnosni zahtjevi. U takvim se industrijskim postrojenjima neizostavno uslijed tehnologije rada pojavljuje strojna i električna rotacijska oprema. Jedan od temeljnih elemenata, svake rotacijske strojne i električne opreme, su kotrljajni kuglični ležajevi. Zbog primjene različite rotacijske opreme u eksplozivnoj atmosferi, da oprema ne bi posjedovala neki od uzročnika paljenja eksplozivne atmosfere neophodno je provesti aktivnosti u cilju povećanja sigurnosti i sprečavanja poremećaja i kvarova. Za provođenje analize kotrljajnih kugličnih ležajeva u eksplozivnoj atmosferi, potrebno je objasniti pojam eksplozivne atmosfere.

Eksplozivna atmosfera može nastati pojavom zapaljivih tvari uz određenu prisutnost zraka (kisika), u obliku:

- a) plinova,
- b) para i
- c) prašina.

Eksplozija može nastati pojavom zapaljive tvari u zraku (s dovoljnom količinom kisika) samo u određenom pojasu koncentracija. Ispod donje granice eksplozivnosti zapaljive tvari (DGE) eksplozivna je smjesa „presiromašna”, dok je iznad gornje granice eksplozivnosti (GGE) eksplozivna atmosfera „prebogata”.



Slika 2.2 Granice eksplozivnosti [62]

Najveći postotak obujamnog omjera zapaljivog plina u smjesi plina i zraka ispod stehiometrijske koncentracije, kod kojega još ne dolazi do eksplozije nakon inicijalnog paljenja, je DGE. Najmanji postotak obujamnog omjera zapaljivog plina u smjesi plina i zraka iznad stehiometrijske koncentracije, kod kojega još ne dolazi do eksplozije nakon inicijalnog paljenja je, GGE.

Stehiometrijska smjesa predstavlja obujamni omjer zapaljive tvari i zraka, kod koje dolazi do potpunog izgaranja bez ostatka zapaljive tvari i kisika. Prilikom paljenja stehiometrijske smjese teoretski dolazi do najintenzivnije eksplozije s najvećim postignutim učincima eksplozije [2].

Eksplozivne atmosfere mogu tvoriti svi zapaljivi mediji samo u određenim okolnostima unutar određenih granica, kao što su [2]:

- obujamni omjeri (koncentracija),
- tlak i
- temperatura smjese.

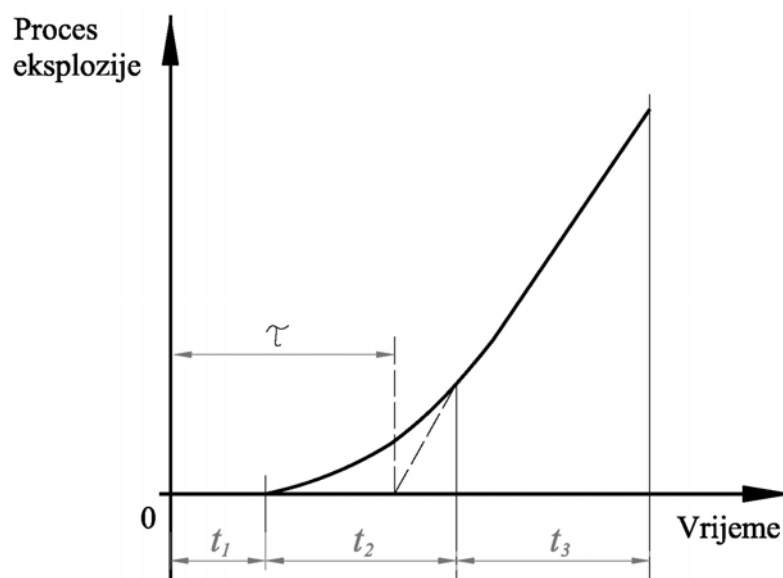
Vremenski tijek eksplozije može se podijeliti na tri dijela:

- a) razdoblje  $t_1$  - iniciranje; početak paljenja
- b) razdoblje  $t_2$  - početak razvijanja lančanog procesa eksplozije,
- c) razdoblje  $t_3$  - eksplozija; proces se stabilizirao u brzi proces izgaranja.

Vremenski tijek eksplozije prikazan je na slici 2.3 gdje je:

$\tau$  - induksijsko vrijeme paljenja,

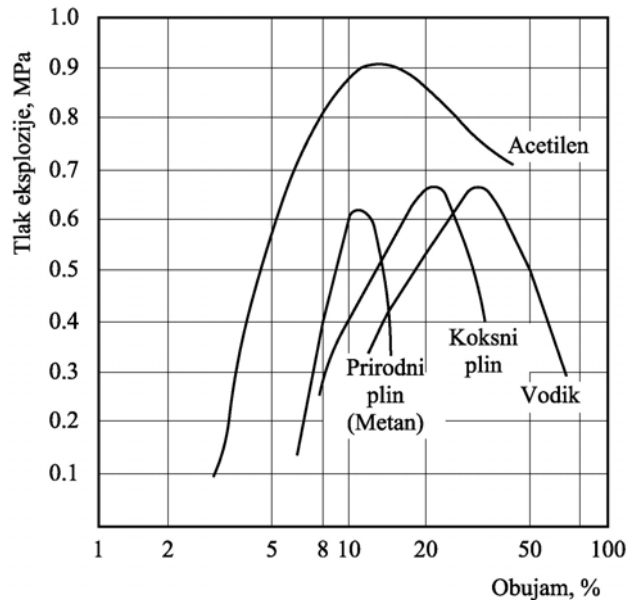
t - vrijeme.



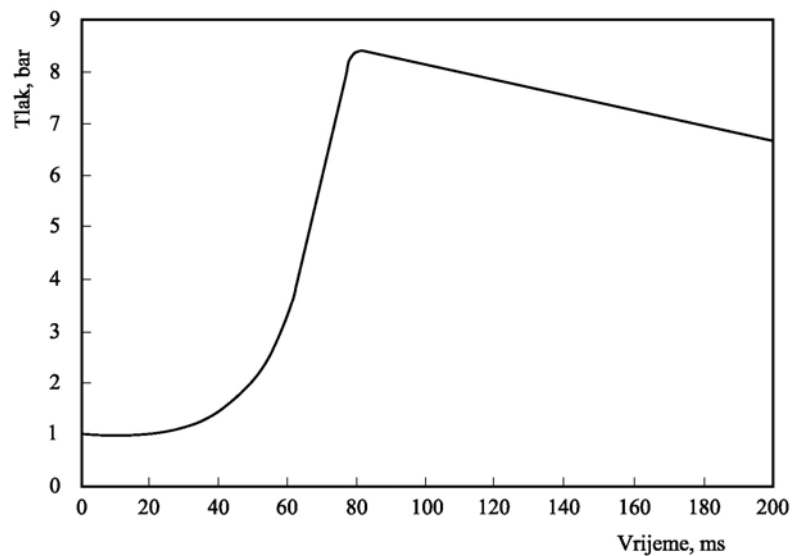
Slika 2.3 Vremenski tijek procesa eksplozije

## 2.2 Eksplozivne smjese plina i zraka

Eksplozivna atmosfera plinova postoji između donje i gornje granice eksplozivnosti po obujamnim omjerima, a koje su svojstvene za svaki plin [63]. Granice eksplozivnosti mogu se prikazati u obujamnim ili masenim omjerima koncentracije. U ovisnosti o obujmu plina u zraku moguće je utvrditi tlak eksplozije (slika 2.4) [64].

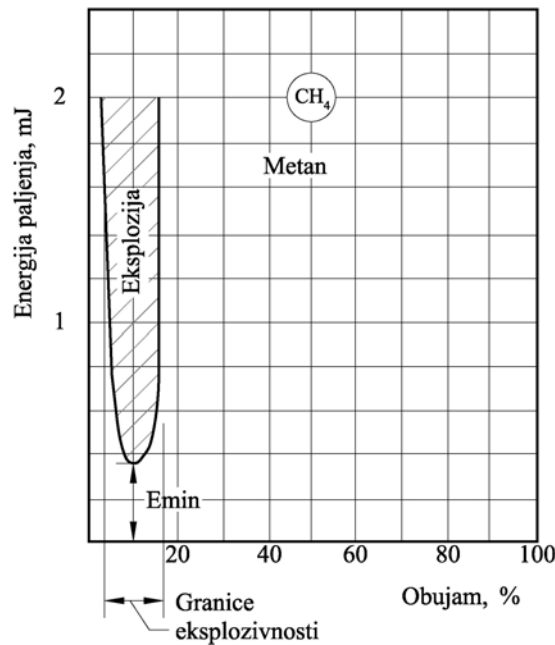


**Slika 2.4** Tlak eksplozije u ovisnosti o obujamnoj koncentraciji za nekoliko plinova. Temeljna pretpostavka za paljenje eksplozivne smjese jest ta da je temperatura uzročnika paljenja dovoljno iznad temperature paljenja plina, kao i da posjeduje energiju iznad najmanje energije potrebne za paljenje eksplozivne smjese.

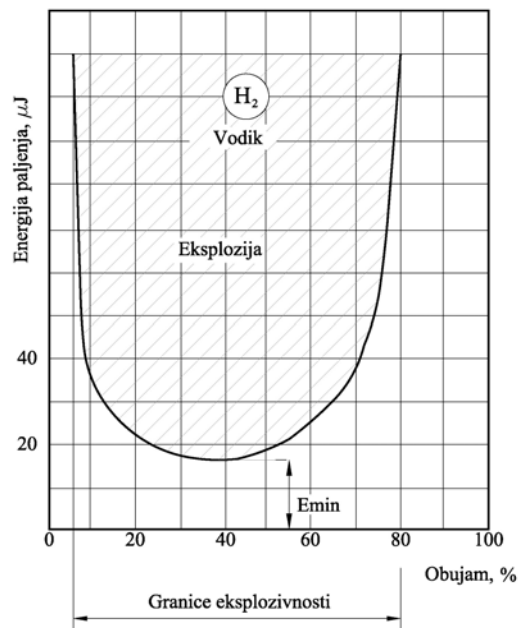


**Slika 2.5** Krivulja tlaka eksplozije u vremenu za smjesu sastavljenu od 10 % metana i 70 % dušika u 20-litarskoj ispitnoj kugli

Slika 2.5 prikazuje tipičnu karakteristiku (krivulju) ovisnosti tlaka o vremenu upaljenog plina. Tlak raste brzo do najviše vrijednosti u razdoblju od nekoliko milisekunda. U prikazanom slučaju krivulja se odnosi na plin metan, no njezin je izgled tipičan za većinu zapaljivih plinova i para [62]. Na slikama 2.6 i 2.7 prikazani su primjeri za smjese vodika i metana sa zrakom. Granice eksplozivnosti za smjesu vodika i metana sa zrakom značajno se razlikuju i po koncentraciji i po potrebnoj energiji paljenja. Eksplozivnu smjesu uz uvjete eksplozije čini označeno područje na slikama 2.6 i 2.7, s označenim vrijednostima najmanje energije paljenja  $E_{min}$  uz odgovarajuće uvjete, npr. tlak i temperaturu okoliša.



**Slika 2.6** Granice eksplozivnosti za smjesu metana i zraka



**Slika 2.7** Granice eksplozivnosti za smjesu vodika i zraka

Za mnoge ugljikovodike GGE i DGE se mogu približno prikazati i odrediti prema izrazima:

$$DGE = 0,55C_{st} \quad (2.1)$$

$$GGE = 3,5C_{st} \quad (2.2)$$

gdje je:

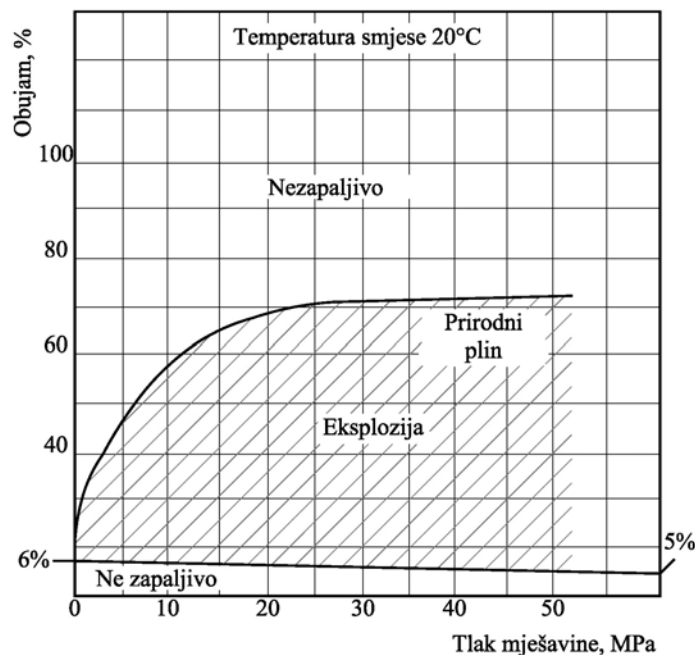
GGE – gornja granica eksplozivnosti (obujamni udio zapaljive tvari u zraku), %,

DGE – donja granica eksplozivnosti (obujamni udio zapaljive tvari u zraku), %,

$C_{st}$  – stehiometrijska koncentracija zapaljive tvari u zraku, %.

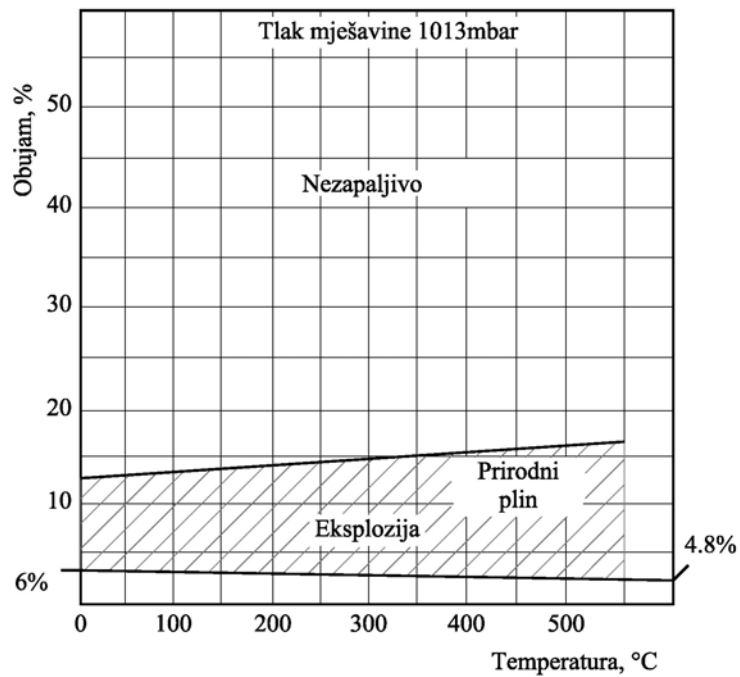
Na granice eksplozivnosti plinske smjese također utječu tlak i temperatura smjese. To znači da se, uz zadovoljene uvjete energije i temperature uzročnika paljenja, granice eksplozivnosti iskazane obujamnim omjerima mijenjaju promjenom tlaka i temperature smjese.

Na slici 2.8 prikazan je utjecaj tlaka na promjene obujamnih granica eksplozivnosti zemnog plina (metana).



**Slika 2.8** Utjecaj tlaka na promjenu obujamnih granica eksplozivnosti zemnog plina (metana)

Općenito, širina područja eksplozivnosti raste s porastom temperature (slika 2.9). Za eksplozivne smjese GGE raste, dok DGE opada. Određene tvari, npr. decane, nisu zapaljive na okolišnoj temperaturi, ali to mogu postati povećanjem temperature [65].



**Slika 2.9** Utjecaj temperature na promjenu obujamnih granica eksplozivnosti zemnog (prirodnog) plina (metan)

### 2.3 Eksplozivne atmosfere para zapaljivih kapljevina i zraka

Rotacijski su strojevi vrlo često instalirani u prostorima u kojima se u normalnom radu pojavljuju zapaljive kapljevine. Zapaljivim kapljevine u pravilu smatramo tvari koje su u okolnostima atmosferskog tlaka (od 85000 Pa do 101325 Pa) i okolišne temperature (od  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) u kapljevitom agregatnom stanju. Najvažnija značajka zapaljivosti kapljevina je plamište. Plamište zapaljivih kapljevina je temperatura kod koje je tlak para dovoljan da nastane koncentracija para u zraku jednaka DGE.

Odnosno, koncentracija DGE iznad površine kapljevine nastat će kada temperatura kapljevine dosegne temperaturu plamišta kapljevine. Najniža temperatura kapljevine je ona pri kojoj u određenim, normiranim uvjetima kapljevina ishlapljuje u količini dostatnoj za stvaranje zapaljive smjese para sa zrakom [1].

Zapaljive kapljevine počat će ishlapljivati čim temperatura kapljevine uzrokuje da parcijalni tlak pare površine kapljevine postane veći od tlaka zraka iznad površine kapljevine. Naime, kod temperature plamišta na površini kapljevine nastaje takav parcijalni tlak koji uzrokuje ishlapljivanje iznad koncentracije DGE. To vrijedi za uvjete normalnog atmosferskog tlaka. Naime, intenzitet ishlapljivanja uz temperaturu:

$$T > T_{pt} \quad (2.3)$$

gdje je:

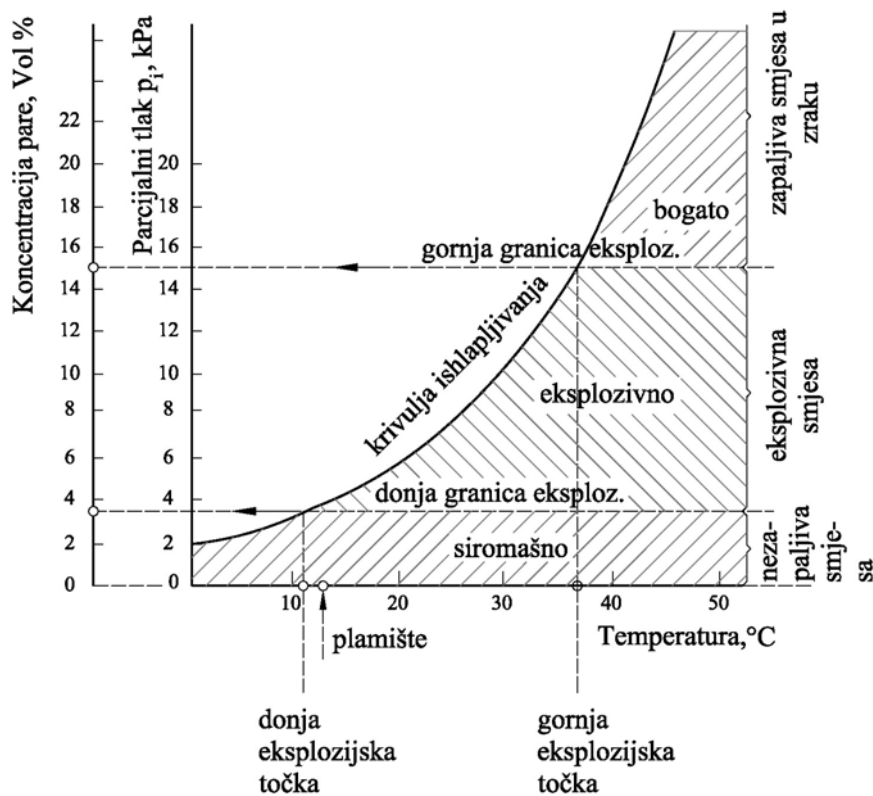
$T_{pl}$  – temperatura plamišta, °C

Temperatura plamišta  $T_{pl}$ , °C ovisna je o razlici atmosferskog tlaka i parcijalnog tlaka isphlapljivanja kapljevine.

Kapljevine kojima je plamište ispod okolišne temperature čine eksplozivnu smjesu na okolišnoj temperaturi te se općenito smatraju opasnijima od onih s višim plamištima. No kapljevine s višim plamištima također postaju opasne zagrijavanjem na temperaturu iznad plamišta.

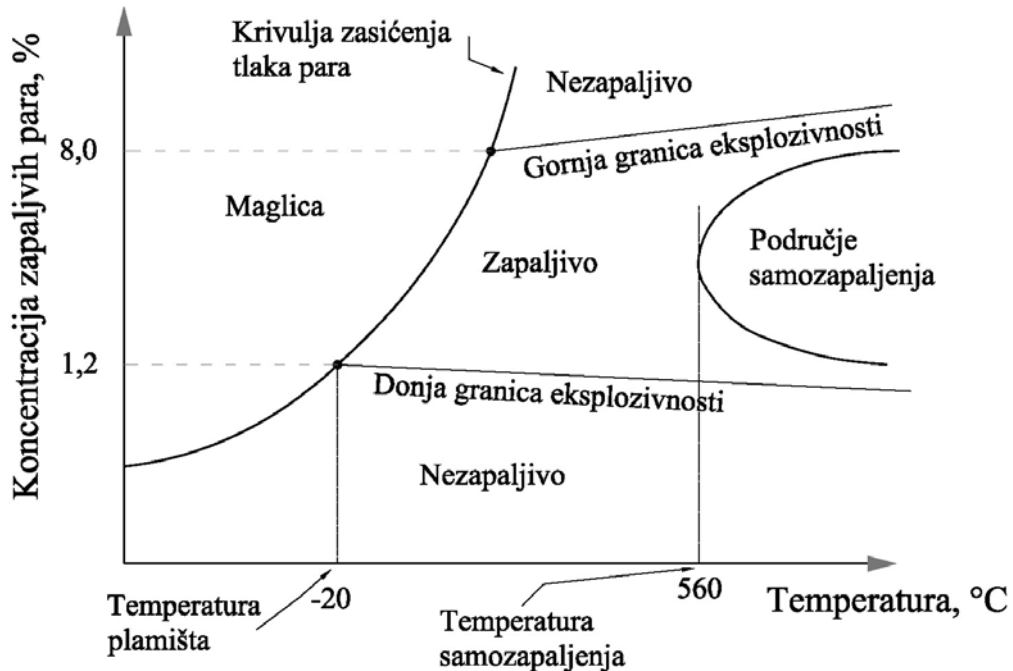
Na temperaturi ispod plamišta, kada je parcijalni tlak premalen u odnosu na atmosferski tlak, nema dovoljno zapaljivih para pa niti mogućnosti stvaranja eksplozivne smjese. Povećanjem temperature kapljevine iznad plamišta počinje isphlapljivanje koje je to intenzivnije što je temperatura kapljevine viša.

U zatvorenom prostoru kapljevine koja isphlapljuje dovest će do povišenja okolnog atmosferskog tlaka, tako da će biti potrebna viša temperatura, odnosno viši parcijalni tlak da se isphlapljivanje nastavi. Tako će se povećavati i koncentracija para u prostoru, te tako stvoriti eksplozivnu atmosferu. Takav proces isphlapljivanja zapaljive kapljevine prikazuje slika 2.10.



Slika 2.10 Granice i točke eksplozivnosti para zapaljivih kapljevine

Na slici 2.11 prikazana je ovisnost koncentracije pare zapaljive tvari o temperaturi. Također je prikazana povezanost temperature plamišta s krivuljom zasićenja tlaka para te donjom i gornjom granicom zapaljivosti. Krivulja zasićenosti tlaka para je eksponencijalna krivulja čiji je porast brži s povišenjem temperature. Donja granica eksplozivnosti (DGE) presijeca krivulju tlaka para i temperaturu plamišta. Na višim temperaturama nalazi se područje samozapaljenja, a najniža temperatura toga područja je temperatura samozapaljenja [66].



**Slika 2.11** Povezanost različitih zapaljivih svojstava (brojčane vrijednosti prikazane su za pare benzina)

## 2.4 Eksplozivna atmosfera uzvitlane prašine i zraka

Uz eksplozivne atmosfere plinova i para, sljedeća je opasnost u kojoj se mogu pojaviti kotrljajni kuglični ležajevi, a ima različiti karakter od eksplozije plinova i para u industrijskim postrojenjima, eksplozivna atmosfera zapaljive prašine. Eksplozije prašina mogu se očekivati u farmaceutskoj, kemijskoj i prehrambenoj industriji, obradi drva, proizvodnji pića, metalurgiji, termoelektranama, određenim rafinerijskim sektorima (koks), rudarstvu i dr.

Postoje dva tipa eksplozivne atmosfere zapaljive prašine. Prvi je tip uzvitlana prašina (oblak) u zraku, koja može činiti eksplozivnu atmosferu koja se ponaša približno jednako kao i atmosfera zapaljivih plinova i zraka. Drugi tip eksplozivne atmosfere zapaljive prašine čini

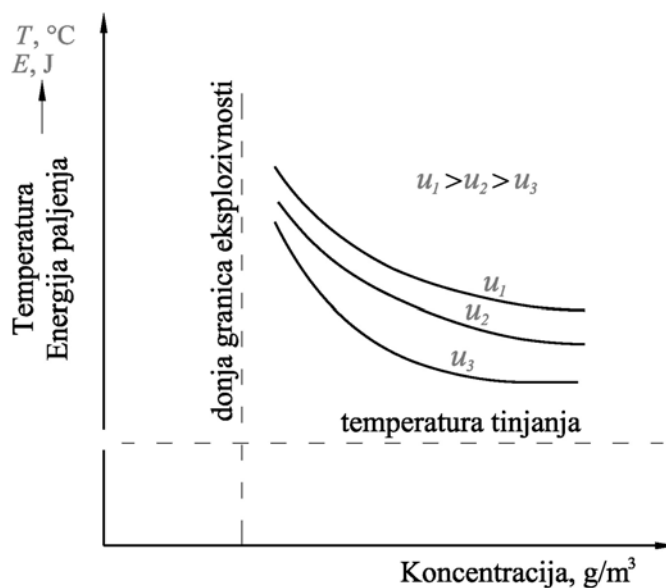


nataložena prašina (sloj), koja se može na bilo koji način uzviti i stvoriti eksplozivnu atmosferu. Osim toga, i prašina nataložena na zagrijanu površinu može se zapaliti ako je temperatura zagrijane površine iznad temperature tinjanja sloja nataložene prašine, čije paljenje može također uzrokovati vitlanje preostale prašine i kao daljnju posljedicu izazvati eksploziju oblaka prašine.

Prema normi HRN EN 61241-10 [3], prašina su sve male krute čestice u atmosferi, uključujući vlakanca i pahulje, koje se talože uslijed vlastite težine, ali koje mogu neko vrijeme lebdjeti raspršene u zraku (uključujući prašinu i pijesak prema ISO 4225 [67]). Prema NFPA 68 [68], prašine su sve fino raspršene čestice s promjerom od 420  $\mu\text{m}$  ili manjim, tj. materijali koji mogu proći kroz standardno sito U.S. br. 40 [65].

Iako se pojmovima prašina i puder (prašak) služi naizmjenično, oni nemaju dogovoreno značenje. Norma BS 2955 [69] opisuje materijal pudera s promjerom čestica manjim od 1000  $\mu\text{m}$ , a materijal prašine s promjerom čestica manjim od 76  $\mu\text{m}$ . Što su čestice finije, to je veća ukupna površina same čestice prašine te je zbog toga i veća vjerojatnost da se takav oblak prašine zapali i eksplodira jer je potrebna manja inicijalna energija za njegovo paljenje.

Temeljni podatak za utvrđivanje DGE jest koncentracija uzvittlane prašine u zraku mjerena u  $\text{g}/\text{m}^3$ , kao što to prikazuje dijagram na slici 2.12 [2]. Prema prikazu u dijagramu, krupnoća zrna ( $u$ ) znatno utječe na uvjete paljenja, ali bitno ne pomiče granice eksplozivnosti. Novija istraživanja ukazuju na to da se najmanja energija paljenja vrlo fine (mikronske) prašine približava vrijednostima za plinove i pare [2]. Naime, najmanja energija paljenja odstupa znatnije samo ako krupnoća zrna dostiže vrijednosti koje već otežavaju vitlanje prašine u zraku, pa se ona lakše taloži.



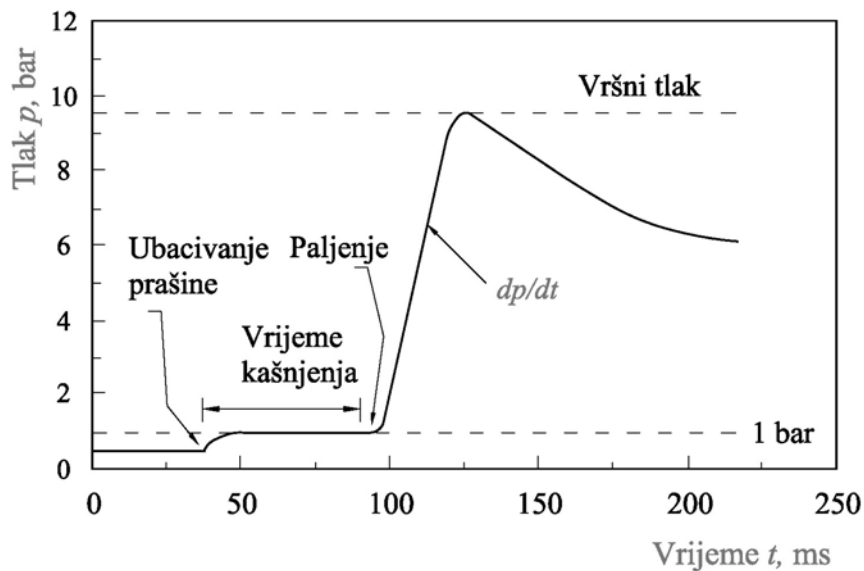
Slika 2.12 Granice eksplozivnosti [2]

Temperatura tinjanja prašine definirana je kao najmanja temperatura pri kojoj dolazi do samozapaljenja nataloženog sloja od 5 mm prašine na zagrijanoj površini.

Materijali koji mogu činiti eksplozivnu atmosferu zapaljive prašine jesu [12]:

- metalne prašine (aluminij, magnezij, cink, čelik, itd.),
- prašine organskog podrijetla (šećer, brašno, žitarice, itd.),
- ugljene prašine,
- sintetički materijali (polimerni materijali, pesticidi, itd.).

Slika 2.13 prikazuje tipičnu krivulju tlak–vrijeme za oblak prašine: tlak raste brzo do najviše vrijednosti u razdoblju od nekoliko milisekunda. Prikazana karakteristika slična je krivulji tlaka eksplozije plinova prikazane na slici 2.5 [65].



**Slika 2.13** Krivulja tlaka za eksploziju oblaka zapaljive prašine

Jačina eksplozije zapaljive prašine može biti izmjerena standardnim ispitnim metodama, tj. dvama parametrima, a to su najveći ostvareni tlak eksplozije  $p_{\max}$  i brzina porasta tlaka eksplozije  $K_{st}$ . Brzina porasta tlaka eksplozije  $K_{st}$  naziva se još i „brizanca” te se može izraziti kao:

$$K_{st} = \left( \frac{dP}{dt} \right)_{\max} V^{\frac{1}{3}} \quad (2.4)$$

gdje je:

$K_{st}$  – „brizanca” - brzina porasta tlaka eksplozije, bar (m·s<sup>-1</sup>)

$p_{\max}$  – najveći ostvareni tlak eksplozije (vršni tlak), Pa,

$V$  – obujam, m<sup>3</sup>.

Brzina porasta tlaka  $K_{st}$  definirana je za prašine na isti način kao i za pare. Brzina porasta tlaka eksplozije  $K_{st}$  bitan je podatak u smislu konstruiranja, odnosno projektiranja zaštitnih mjera, no i mala brzina - brzina širenja eksplozije, ako se razvije visoki tlak, može uzrokovati velika razaranja i štetu. Općenito je uočeno da s porastom faktora  $K_{st}$  eksplozija prašine postaje značajno snažnija.

Opasnost od pojave eksplozija prašina pojavljuje se osobito kod uzvitlane prašine. Postojanje uzvitlane prašine u zraku tehnološki se rijetko pojavljuje, osim u zatvorenoj tehnološkoj opremi kao što su silosi, cikloni, transportna oprema i sl., a u normalnim uvjetima rada i u ugljenokopima. U takvim je prostorima sigurno da su u većini slučajeva koncentracije unutar granica eksplozivnosti ili, bolje rečeno, iznad donje granice eksplozivnosti. No mnogo veća opasnost od eksplozije prašine postoji kod nataložene prašine koja predstavlja moguću opasnost da bude uzvitlana i kao takva, eksplozivna. Jedan od mogućih uzroka uzvitlavanja je tinjavo paljenje koje posredno ili neposredno može izazvati tzv. buktanje ili intenzivnije gorenje koje redovito uzvitla ostatak prašine i ujedno čini uzročnik paljenja tako uzvitlane prašine u obliku eksplozije. Drugi uzroci uzvitlavanja prašine mogu biti razna strujanja zraka izazvana predviđenim ili nepredviđenim tehnološkim ili atmosferskim uvjetima.

Paljenje tinjanjem može nastupiti ako je temperatura površine  $T$  na kojoj je nataložena prašina:

$$T > T_{ii} \quad (2.5)$$

gdje je:

$T$  – temperatura površine, °C

$T_{ii}$  – temperatura tinjanja, °C

Temperatura tinjanja  $T_{ii}$  definirana je kao temperatura zagrijane horizontalne površine kod koje dolazi do samozapaljenja 5 mm (europska praksa), odnosno 12,5 mm (sjevernoamerička praksa) nataloženog sloja prašine.

Za paljenje eksplozivne smjese uzvitlane prašine moramo imati temperaturu  $T_u$  i energiju uzročnika paljenja  $E_u$  :

$$T_u > T_{ii} \quad (2.6)$$

$$E_u > E_{\min} \quad (2.7)$$

$$T_u > T_p \quad (2.8)$$

gdje je:

$T_p$  – temperatura paljenja uzvitlane prašine čini najnižu temperaturu kod koje se uzvitlana prašina pali u obliku eksplozije. Pri tom je  $T_p > T_{ti}$ ,

$T_u$  – temperatura uzročnika paljenja,

$E_{min}$  – najmanja energija uzročnika čija je temperatura iznad  $T_p$  za tu prašinu potrebna za paljenje uzvitlane zapaljive prašine.  $E_{min}$  je ovisna o postotku sadržaja hlapljivih tvari i za uobičajenu ugljenu prašinu mnogo je veća (reda 10) od minimalne energije paljenja plina npr. metana.

$E_u$  – energija uzročnika paljenja,

Mogući utjecaj tinjavog paljenja na uzvitlavanje eksplozivne smjese prašine i zraka možemo prikazati slijedom:

tinjavo paljenje → buktanje → uzvitlana prašina

Za rudnike s podzemnom eksploatacijom ugljena, prašina može biti posebno neugodna. Naime, paljenje i najmanje količine metana, tj. jamskog plina, redovito uzrokuje uzvitlanu ugljenu prašinu koja se istodobno i zapali eksplozijom plina pa dolazi do tzv. lančane eksplozije prašine koja može doseći katastrofalne razmjere. Prema tome, vrlo opasan slijed događaja u prostorima ugroženim eksplozivnom smjesom plina i nataložene prašine možemo prikazati npr. za metanske rudnike:

eksplozija  $\text{CH}_4$  → uzvitlana prašina → eksplozija prašine

Zbog toga se u prostorima ugroženim eksplozivnim atmosferama mora strogo voditi računa o taloženju zapaljive prašine koja je dvojako opasna:

- kao uzročnik paljenja (tinjavo samozapaljenje) jamskog plina i
- kao potencijalni medij za eksploziju oblaka prašine, kao posljedice paljenja jamskog plina.

## 2.5 Minimalna energija i temperatura paljenja

Ako uzročnik paljenja ima energiju manju od najmanje energije paljenja, on ne može zapaliti eksplozivnu atmosferu, tj. do eksplozije ne može doći. Minimalna energija paljenja plina je najmanja energija koja je potrebna za paljenje najzapaljivije smjese tog plina. Različite smjese plina i zraka zahtijevaju različite iznose energije za paljenje [70].

Najmanje energije paljenja za neke plinove ili pare prikazane su u tablici 2.2, a za prašine u tablici 2.3.

**Tablica 2.2** Najmanje energije paljenja eksplozivnih smjesa plinova i para sa zrakom [2]

Zapaljivi plin ili para	Kemijska formula	Obujamna koncentracija, %	Najmanja energija paljenja, mJ
metan	CH <sub>4</sub>	8,8	0,28
propan	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	5,0	0,26
etan	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	6,5	0,25
butan	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	4,7	0,25
heksan	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	3,8	0,24
heptan	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	3,4	0,24
benzen (benzol)	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	4,7	0,20
dietileter	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O	5,1	0,19
etilenoksid	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O	8,0	0,06
acetilen	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	8,5	0,019
vodik	H <sub>2</sub>	29	0,019
ugljik-disulfid	CS <sub>2</sub>	8,5	0,009

Minimalna energija paljenja potrebna je da se najmanji obujam dovede na temperaturu koja će omogućiti paljenje. Temperatura samozapaljenja definirana je kao najniža temperatura koja će neku cjelokupnu smjesu goriva i oksidanta dovesti do spontanog paljenja. [71]. Stoga ona uvelike ovisi o obujam, stehiometriji, tlaku i geometriji plinske smjese. Kašnjenje paljenja je vrijeme koje je potrebno da se zapaljiva smjesa u dodiru s vrućom površinom upali. To je ovisno o prijelazu topline između vruće površine i zapaljive smjese. Energija paljenja manje je osjetljiva na eksperimentalni uzorak od minimalne temperature paljenja, koja je vrlo ovisna o čimbenicima kao što su obujam zapaljive smjese na toj temperaturi i vrijeme koje je proteklo na toj temperaturi. Dakle, energiju paljenja obično je dobro koristiti za karakteriziranje zapaljivosti smjesa [72].

**Tablica 2.3** Temperature paljenja oblaka i sloja nekih učestalih zapaljivih prašina

Materijal	Najmanja energija paljenja, mJ	Temperatura paljenja, °C	
		Oblaka	Sloja
aluminij	15	550	740
ugljen	60	610	170
riža	50	440	220
šećer	30	370	400
pšenično brašno	50	380	360

Energija paljenja može se mjeriti za određena goriva i kisik ili smjesu goriva i zraka, nalazeći minimalnu energiju potrebnu da električna iskra zapali smjesu [73]. Energija paljenja ovisna je o temperaturi smjese, tlaku i sastavu te je u pravilu najmanja kad je smjesa blizu ili je odmah ispod stehiometrijske za određene uvjete.

Minimalne energije paljenja na atmosferskim uvjetima prema Leesu [73] i Medardu [74] za nekoliko različitih ugljikovodika prikazane su u tablici 2.4. Različitosti između energija paljenja dokazuju stupnjeve promjenjivosti između različitih pokusa (eksperimenata). Metan ima višu energiju paljenja od ostalih alkana zato što sadrži samo vezu ugljik-vodik, koja je mnogo čvršća nego veza ugljik-ugljik pa je prema tome potrebna veća energija za njezin prekid. Međutim, dodatak malih iznosa viših alkana metanu (kao što je slučaj u prirodnom plinu) smanjuje energiju paljenja disproporcionalno količini viših alkana, zato što veza ugljik-ugljik, i u malome broju, smanjuje iznos energije paljenja.

**Tablica 2.4** Najmanja energija paljenja  $E_{min}$  (za nekoliko učestalih ugljikovodika)

Zapaljiva tvar	Najmanja energija paljenja, mJ	
	prema Leesu [73]	prema Medardu [74]
metan	0,29	0,47
etan	0,24	0,28
propan	0,25	0,30
butan	0,25	–
heksan	0,25	–

Najmanja energija paljenja,  $E_{min}$  vrlo je ovisna o stehiometriji (tj. koncentraciji metana u zraku), kao što je bilo prikazano na slici 2.6 koju je dao Lees [73] za smjesu metana i zraka. Promatrajući određeni rotacijski uređaj kao potencijalni uzročnik paljenja eksplozivne atmosfere, može se uvidjeti da električna iskra ili električni luk nisu jedini mogući uzročnik paljenja; to može biti i uređaj u normalnom pogonu ili u slučaju preopterećenja ili djelomičnog pregrijavanja u slučaju kvara [2]. Takav uzročnik paljenja ima dovoljno toplinske energije, kao što i električna iskra ima dovoljno visoku temperaturu. Zbog toga se postavlja pitanje kolika je najmanja temperatura potrebna da izazove paljenje eksplozivne atmosfere. Dogovoreno je, što je i fizikalno ispravno, da je svim molekulama eksplozivne smjese potrebno povisiti temperaturu do temperature pri kojoj će doći do procesa gorenja u obliku eksplozije bez posebnog uzročnika. Drugim riječima, povećanjem temperature eksplozivnoj stehiometrijskoj smjesi plina i zraka, uz normalni atmosferski tlak od 101325 Pa, po kinetičkoj teoriji plinova

dolazi do ubrzanog kretanja molekula i njihovih međusobnih sudaranja. Tom se prilikom oslobađa dovoljna energija da dođe do tzv. spontanog lančanog gorenja u čitavoj zagrijanoj smjesi u obliku eksplozije.

U svrhu određivanja najmanje temperature paljenja plinova i para, određeni su mjerna metoda i mjerni uređaj prema HRN EN 60079-4 [75]. Potrebno je napomenuti da je mjerenjima utvrđeno da temperature paljenja stehiometrijske smjese ne daju najniže temperature paljenja, već da se u pravilu najniže temperature paljenja dobiju kod smjese koja je nešto bogatija od stehiometrijske (tablica 2.5). No te razlike nemaju praktično značenje, pa je zbog toga metoda mjerenja utemeljena na stehiometrijskoj smjesi.

**Tablica 2.5** Temperature paljenja nekoliko plinova prema HRN IEC TR 60079-20 [76]

Tvar	Vrelište, °C	Temperatura paljenja, °C	Granice eksplozivnosti, %		Relativna gustoća u odnosu na zrak (zrak=1)	Skupina plinova
			Donja	Gornja		
acetilen	-83	305	2,3	100	0,9	IIC
etilen	-104	425	2,3	36	0,97	IIB
vodik	-252	560	4	77	0,07	IIC
metan	-162	537	4,4	17,0	0,55	IIA
propan	-42	470	1,7	10,9	1,56	IIA

## 2.6 Razvrstavanje zapaljivih plinova, para i prašina u odnosu na uređaje

Kako bi se provela određena mjera zaštite od paljenja eksplozivne atmosfere, potrebno je plinove i pare prvenstveno razvrstati u skupine, i to prema kriteriju temperature paljenja i energije paljenja.

Temeljna podjela uređaja namijenjenih uporabi u eksplozivnoj atmosferi obuhvaća dva temeljna područja, odnosno skupine:

Skupina I: jamski plinovi i ugljena prašina, podzemni rudnici, od kojih je glavni predstavnik metan ( $\text{CH}_4$ ) s primjesama ugljikovodika višeg reda čiji je udio manji od 10 % i s naslova protueksplozijske zaštite nema fizikalnog značenja;

Skupina II: svi plinovi uključujući i metan, pare i prašine u suvremenoj industrijskoj tehnologiji, na ostalim mjestima uporabe osim rudnika.

Skupina II koja prvenstveno pokriva industrijska postrojenja mnogo je zastupljenija.

### 2.6.1 Razvrstavanje zapaljivih plinova i para prema temperaturi paljenja

Uređaji koji su namijenjeni uporabi u eksplozivnim atmosferama plinova i para razvrstani su u temperaturne razrede (tablici 2.6). Razvrstavanje plinova i para u odgovarajuće temperaturne razrede provodi se na temelju njihove temperature paljenja (tablica 2.6). Temperaturni razredi podijeljeni su od T1 (najviša temperatura paljenja) do T6 (najniža temperatura paljenja).

**Tablica 2.6** Razvrstavanje dozvoljenog zagrijavanja uređaja u temperaturne razrede

Područje uporabe	Temperaturni razred	Najviša dozvoljena temperatura površine uređaja, °C	Temperatura paljenja plina ili pare, °C
I	-	200	>200
	T1	450	>450
II	T2	300	300-450
	T3	200	200-300
	T4	135	135-200
	T5	100	100-135
	T6	85	> 100

**Tablica 2.7** Usporedba temperaturnih razreda na nacionalnoj (Japan, SAD) i internacionalnoj praksi (IEC; CEN; CENELEC) [77]

Europa (CEN; CENELEC) Svijet (IEC)		Japan (RIIS-TR-79-1)		SAD (NEC 1984)	
Temperaturni razred	Najviša temperatura površine, °C	Temperaturni razred	Najviša temperatura površine, °C	Temperaturni razred	Najviša temperatura površine, °C
T1	450	G1	360	T <sub>1</sub>	450
T2	300	G2	240	T <sub>2</sub>	300
				T <sub>2A</sub>	280
				T <sub>2B</sub>	260
				T <sub>2C</sub>	230
				T <sub>2D</sub>	215
T3	200	G3	160	T <sub>3</sub>	200
				T <sub>3A</sub>	180
				T <sub>3B</sub>	165
				T <sub>3C</sub>	160
T4	135	G4	110	T <sub>4</sub>	135
				T <sub>4A</sub>	120
T5	100	G5	80	T <sub>5</sub>	100
T6	85	G6	70	T <sub>6</sub>	85



### 2.6.2 Razvrstavanje zapaljivih plinova i para prema energiji paljenja

Razvrstavanje zapaljivih plinova i para provodi se na dva načina:

- probojnom paljenju – pri čemu je uveden pojam „maksimalni eksperimentalni sigurnosni raspor” – MESR, kao pojam graničnog raspora (eng. *Maximum Experimental Safe Gap*) te se provodi prema normi HRN IEC 60079-1-1,
- struji paljenja – pri čemu je uveden pojam: „minimalna struja paljenja” - MSP (eng. *Minimum Ignition Current*) kao pojam granične struje paljenja određenoga referentnog strujnog kruga (primjenjivo kod električne opreme).

**Tablica 2.8** Skupine plinova i para prema MESR

Skupina plinova	MESR, mm
I	samo metan
IIA	> 0,9
IIB	0,5 do 0,9
IIC	< 0,5

### 2.6.3 Razvrstavanje zapaljivih prašina

Razvrstavanje prema svojstvima prašina provodi se prema temperaturi paljenja oblaka prašine ili prema temperaturi tinjanja sloja prašine. Uređaj koji radi u eksplozivnoj atmosferi prašine gdje dolazi do taloženja prašine potrebno je analizirati prema temperaturi tinjanja zapaljive prašine. No ako uređaj radi u eksplozivnoj atmosferi prašine gdje dolazi do pojave oblaka prašine potrebno ga je analizirati prema temperaturi paljenja oblaka zapaljive prašine.

Podjela prašina provodi se prema brzini prirasta tlaka  $K_{st}$  te se najčešće koristi u prehrambenoj industriji (tablica 2.9).

**Tablica 2.9** Podjela zapaljivih prašina prema brzini prirasta tlaka eksplozije

Razred eksplozivnosti prašine	$K_{st}$ , bar ( $m s^{-1}$ )	Primjer prašine	Karakteristike
St 0	0	kamena prašina	nema eksplozije
St 1	> 0 < 200	prašina pšenice	slaba eksplozija
St 2	> 200 < 300	organska bojila	jaka eksplozija
St 3	> 300	aluminijaska prašina	vrlo jaka eksplozija

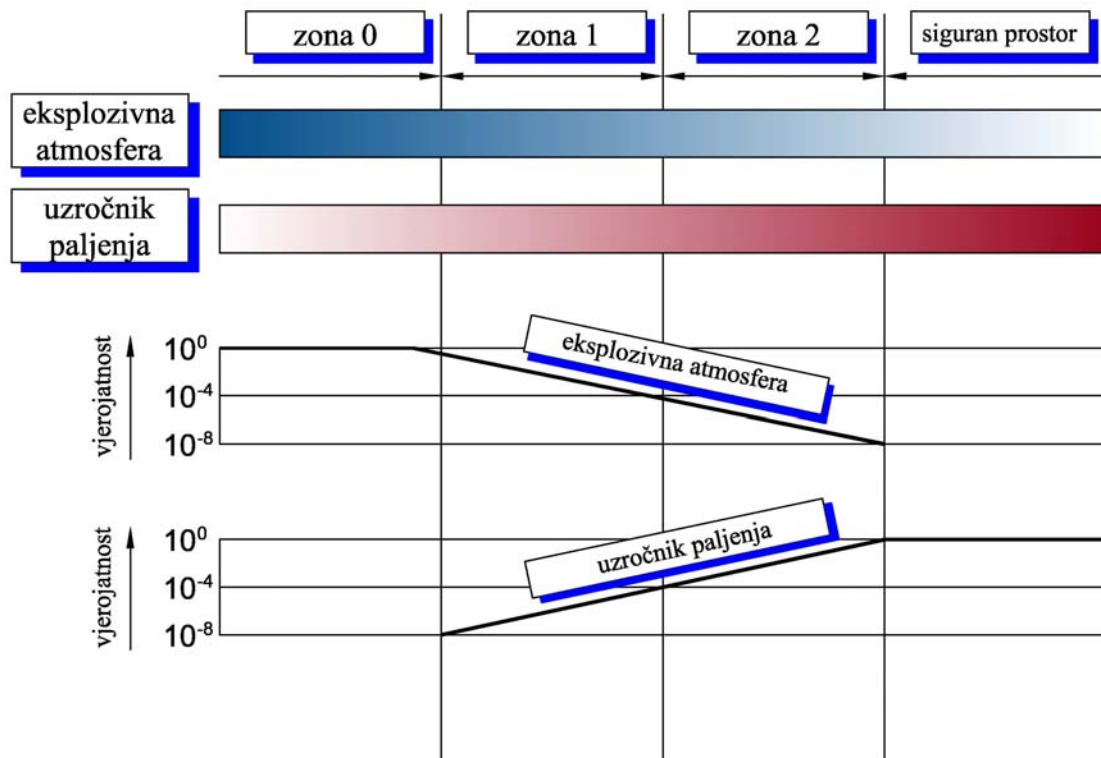
Oblak prašine eksplodirat će samo ako je koncentracija prašine u određenim granicama. Općenito govoreći, može se navesti da su granice eksplozivnosti prašine u zraku sljedeće [28]:

- najniža koncentracija od  $50 \text{ g/m}^3$  do  $100 \text{ g/m}^3$
- najviša koncentracija od  $2 \text{ kg/m}^3$  do  $3 \text{ kg/m}^3$

## 2.7. Zone opasnosti i klasifikacija prostora

U industrijskim se postrojenjima kotrljajni kuglični ležajevi u rotacijskoj opremi nalaze u različitim prostorima. Oni se klasificiraju u zone opasnosti, ovisno o vjerojatnosti pojave eksplozivne atmosfere.

Može se zaključiti da je eksplozija zapravo posljedica koincidencije pojave eksplozivne atmosfere i uzročnika paljenja. Zapravo, ako je vjerojatnost nastanka i postojanja eksplozivne atmosfere velika, tada vjerojatnost uzročnika paljenja mora biti mala, ili obratno: ako je vjerojatnost prisutnosti eksplozivne atmosfere mala, može se (uvjetno) dopustiti veća vjerojatnost postojanja uzročnika paljenja. Vjerojatnost pojave eksplozivne atmosfere i uzročnika paljenja prikazana je na slici 2.14, u ovisnosti o klasificiranim zonama.



Slika 2.14 Vjerojatnosti postojanja eksplozivne atmosfere i uzročnika paljenja u pojedinim zonama opasnosti

Na slici 2.14 izraz siguran prostor označava neugroženi prostor odnosno prostor neugrožen od pojave eksplozivne atmosfere. Određeni autori [2] temelje razmatranje vjerojatnosti nastanka eksplozije na vjerojatnosti poklapanja dvaju događaja: pojave eksplozivne atmosfere i uzročnika paljenja. To jest, smatraju da do eksplozije neće doći ukoliko je umnožak vjerojatnosti postojanja eksplozivne atmosfere i mogućeg uzročnika u svim zonama manji od  $10^{-8}$ , prema prikazu u tablici 2.10.

**Tablica 2.10** Vjerojatnost postojanja eksplozivne atmosfere i uzročnika paljenja

Parametri za nastanak eksplozije	Zone opasnosti			
	zona 0	zona 1	zona 2	siguran prostor
Vjerojatnost postojanja eksplozivne atmosfere	$10^0$	$10^{-2}$	$10^{-4}$	$< 10^{-8}$
Vjerojatnost postojanja uzročnika paljenja eksplozivne atmosfere	$< 10^{-8}$	$< 10^{-6}$	$< 10^{-4}$	$< 10^0$

Kako je već rečeno u uvodnome dijelu, industrijska postrojenja u kojima se pojavljuju zapaljive tvari klasificiraju se u zone opasnosti. Postupak kojim se to provodi naziva se klasifikacija prostora te se za plinove i pare temelji na normi HRN EN 60079-10 [1], a za prašine na normi HRN EN 61241-10.

Prostori u industrijskim postrojenjima u kojima se pojavljuje eksplozivna atmosfera plinova i para klasificiraju se u tri zone opasnosti:

- Zona 0: prostori u kojima je eksplozivna atmosfera prisutna kontinuirano, u duljim vremenskim razdobljima ili vrlo često.
- Zona 1: prostori u kojima je pojava eksplozivne atmosfere vjerojatna povremeno, u normalnom radu postrojenja.
- Zona 2: prostori u kojima pojava eksplozivne atmosfere nije vjerojatna u normalnom radu, ali ako se i pojavi, trajat će samo kratko.

Ostali prostori u industrijskim postrojenjima u kojima se ne očekuje prisutnost eksplozivne atmosfere u količini koja iziskuje posebne mjere u pogledu konstrukcije, ugradnje i uporabe opreme nazivaju se neugroženi prostori.

Prostori u industrijskim postrojenjima u kojima se pojavljuje eksplozivna atmosfera zapaljive prašine klasificiraju se također u tri zone opasnosti:

- Zona 20 - prostori u kojima je eksplozivna atmosfera u obliku oblaka zapaljive prašine u zraku prisutna stalno, ili u dugim vremenskim intervalima, ili često, u kraćim

vremenskim intervalima. Redovito se pojavljuje i taloženje prašine uz vrlo otežano kontroliranje debljine sloja nataložene prašine.

Zona 21 - prostori u kojima se eksplozivna atmosfera u obliku oblaka zapaljive prašine u zraku može pojaviti povremeno u normalnom radu. Postoji mogućnost kontroliranja taloženja prašine te ograničenog rasprostiranja oblaka prašine oko izvora zaprašivanja.

Zona 22 - prostori u kojima se eksplozivna atmosfera u obliku oblaka zapaljive prašine u zraku ne pojavljuje u normalnom radu, odnosno ukoliko se pojavi, postoji samo kratkotrajno. Prvenstveno su to prostori manje zaprašivosti, osobito ako je taloženje prašine moguće kontrolirati povremenim čišćenjem.

### **2.7.1 Izvori ispuštanja zapaljivih tvari**

Polazna osnova za određivanje vrsta zona ugroženosti jesu prepoznavanje izvora ispuštanja i određivanje stupnja ispuštanja.

Eksplozivna atmosfera može postojati samo ako je uz zapaljivi plin ili paru prisutan i zrak, pa je potrebno analizirati mogu li te tvari postojati u promatranom prostoru. Općenito, takvi plinovi i pare nalaze se unutar procesne opreme koja može, ali u većini slučajeva ne mora biti potpuno zatvorena (plintijesna). Svaki dio procesne opreme (npr. pribornice na cjevovodima, spremnik, odušni ventil, sigurnosni ventil itd.) valja promatrati kao mogući izvor ispuštanja zapaljive tvari. Ako promatrani dio ne može sadržavati zapaljivu tvar, jasno je da ne može uzrokovati ni postojanje ugroženog prostora (zonu opasnosti) u svojem okolišu. Isto vrijedi i za dijelove koji sadrže zapaljivu tvar, ali je ne mogu ispuštati u atmosferu (npr. potpuno zavareni cjevovod ne promatra se kao izvor ispuštanja).

Klasifikacija prostora temelji se na razmatranju medija (sastav, gustoća, DGE, plamište, skupina plinova, temperaturni razred i dr.), količine ispuštanja i uvjeta ventilacije prostora u kojem se ispuštanje pojavljuje. Ventilacija prostora temeljno se dijeli na prirodnu i prisilnu ventilaciju. Prirodna ventilacija je na otvorenom prostoru, neometanom za strujanje okolnog zraka, a prisilna se prvenstveno upotrebljava u zatvorenim prostorima te se postiže pomoću ventilatora.

Ustanovi li se da promatrani dio (procesne opreme) može zapaljivu tvar ispuštati u atmosferu, prije svega treba odrediti stupanj ispuštanja u skladu s definicijama, utvrđivanjem vjerojatne učestalosti i trajanja ispuštanja. Izvori ispuštanja zapaljivog medija mogu se podijeliti prema stupnjevima ispuštanja:

- trajni izvori ispuštanja zapaljive tvari: svi izvori koji kontinuirano ispuštaju zapaljivi plin, paru ili prašinu. Trajni izvor ispuštanja zapaljivi medij može ispuštati vrlo često s nevelikim trajanjem, ili se ispuštanja mogu događati rijetko i dugo trajati. Primjeri za izvore ispuštanja plinova i para su prostori unutar spremnika i prostor iznad zapaljive kapljevine koja hlapi. Primjeri za izvore ispuštanja prašina su unutrašnjost zatvorenog prostora koji sadrži prašinu, miješalice, mlinovi i dr. U pravilu, trajni izvori ispuštanja stvaraju uvjete za klasifikaciju prostora s plinovima i/ili parama u zonu 0, a s prašinama u zonu 20.
- primarni izvori ispuštanja zapaljive tvari: svi izvori ispuštanja koji su predviđeni tehnološkim procesom, odnosno kod kojih je ispuštanje očekivano u normalnom radu. Primarni izvori ispuštanja pojavljuju se često i njihovo trajanje nije ni kratkotrajno ni dugotrajno. Primjeri za primarne izvore ispuštanja plinova i para su gubici kod crpki i kompresora, uzimanje uzoraka, odušni ventili spremnika, punjenje zapaljivih tvari, sušenja obojanih predmeta itd. Primjeri za izvore ispuštanja prašina su mjesta u blizini presipnih mjesta ili opskrbnih traka, mjesta uzimanja uzoraka, stanice za istovar kamiona, mjesta za iskrcaj trakastog transportera. U pravilu, primarni izvori ispuštanja stvaraju uvjete za klasifikaciju prostora s plinovima i/ili parama u zonu 1, a s prašinama u zonu 21.
- sekundarni izvori ispuštanja zapaljive tvari: svi izvori ispuštanja koji se pojavljuju vrlo rijetko, a ukoliko se pojave, traju kratko. Što znači da se ispuštanje normalno ne očekuje ili se očekuje vrlo rijetko, a ako do njega ipak dođe, ono će trajati kratko. U pravilu, sekundarnim izvorima plinova i para ponajviše smatramo mjesta kvarova u tehnološkom procesu; s obzirom da je njih u postrojenju vrlo teško precizno locirati, čitavo se postrojenje tretira kao mjesto mogućeg kvara. Sekundarni izvori ispuštanja obično stvaraju uvjete za klasifikaciju prostora s plinovima i/ili parama u zonu 2, a s prašinama u zonu 22.

Izvore ispuštanja vrlo često nije moguće jednoznačno klasificirati jer mogu imati svojstva više tipova izvora ispuštanja; stoga ih u tom slučaju smatramo višestrukim izvorima ispuštanja. Na primjer, neki izvor ispuštanja u normalnom pogonu može biti primarni izvor ispuštanja, a u slučaju kvara zbog kvara u postrojenju ili pogrešno vođenog tehnološkog procesa postaje sekundarni izvor ispuštanja mnogo većeg kapaciteta. Tako da se oko tog izvora ispuštanja klasificira zona 1 (u manjem opsegu, tj. radijusu), a zatim zona 2, u većem radijusu.

### 2.7.2 Svrha klasifikacije prostora

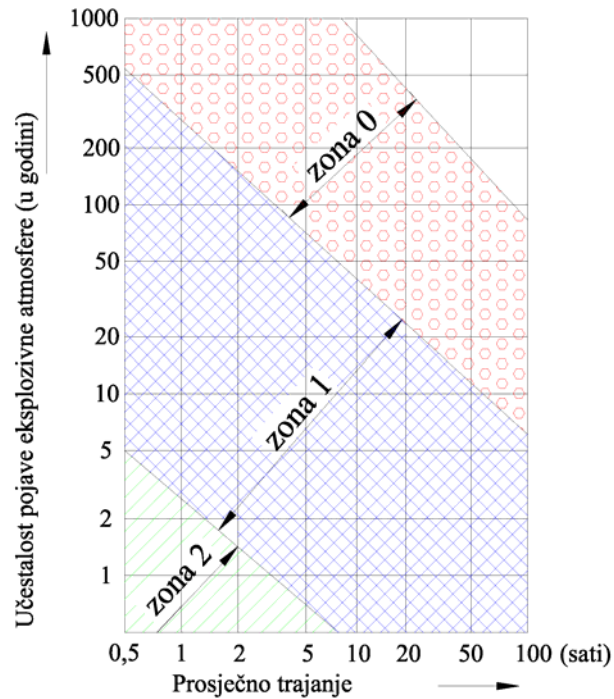
Klasifikacija prostora je postupak analize i razvrstavanja okoliša u kojoj može doći do pojave eksplozivne atmosfere, čija je svrha lakši izbor prikladnih uređaja za sigurnu uporabu u takvom okolišu, pri čemu se vodi računa o skupini plinova i temperaturnom razredu. Bez provedenog postupka klasifikacije prostora, tj. razvrstavanja prostora s eksplozivnom atmosferom postrojenja, u zone opasnosti, nemoguće je utvrditi u kojoj se mjeri eksplozivna atmosfera pojavljuje; pa ni definirati zahtjeve na rotacijsku opremu.

U većini praktičnih situacija u kojima se uporabljaju zapaljive tvari teško je jamčiti da do pojave eksplozivne atmosfere nikada neće doći. Također, nije uvijek moguće jamčiti da oprema nikada neće postati uzročnikom paljenja (u normalnom radu ili u kvaru). Zbog toga se u situacijama gdje postoji velika vjerojatnost pojave eksplozivne atmosfere (zona 1) težište stavlja na uporabu uređaja s malom vjerojatnošću da postanu uzročnikom paljenja. Za razliku od toga, ondje gdje je vjerojatnost pojave eksplozivne atmosfere smanjena (zona 2), smiju se uporabljati uređaji izrađeni prema blažim zahtjevima.

Početni korak u klasifikaciji prostora je procjena vremena trajanja izvora ispuštanja, u skladu s definicijom zone 0, zone 1 i zone 2. Zatim slijedi procjena količina ispuštanja zapaljivog medija kroz izvor ispuštanja, njegova koncentracija, brzina ispuštanja, ventilacija i drugi čimbenici koji utječu na vrstu i na rasprostiranje zona opasnosti. Postupak klasifikacije provodi se u skladu s normom HRN EN 60079-10 [1]. Na temelju omjera učestalosti pojave i prosječnog trajanja eksplozivne atmosfere, može se približno dati i grafička podjela vjerojatnosti pojave eksplozivne atmosfere u ugroženom prostoru, kao što to prikazuje slika 2.15 [2].

Općenito se može odrediti da kod zadovoljavajuće ventilacije oko izvora ispuštanja zapaljive tvari nastaju zone opasnosti i to prema sljedećem:

- trajni izvor: u pravilu zona 0, ali i uz zonu 1 i zonu 2,
- primarni izvor: u pravilu zona 1, ali i uz zonu 2,
- sekundarni izvor: u pravilu zona 2.



**Slika 2.15** Vremenski kriterij za podjelu ugroženog prostora na zone opasnosti u omjeru na učestalost pojave i trajanja eksplozivne atmosfere i uzročnika paljenja

### 2.7.3 Klasifikacija prostora sa zapaljivim prašinama

Određena industrijska postrojenja mogu biti ugrožena eksplozivnom atmosferom zapaljive prašine, na taj način da se zapaljiva prašina nalazi u bilo kojem obliku:

- stvaranje eksplozivne atmosfere uzvitrane prašine, odnosno u obliku oblaka prašine iz bilo kojeg izvora ispuštanja, uključujući sloj ili nakupinu;
- taloženje slojeva prašine koji vjerojatno neće stvoriti oblak prašine, ali koji se mogu zapaliti zbog vrućih površina na kojima se prašina taloži. Zapaljenjem sloja prašine može doći do buktanja, a zatim može uslijediti i eksplozija tako uzvitrane prašine i te lančanog procesa daljnjeg uzvitlavanja prašine i eksplozije.

Uzvitrana prašina, odnosno oblak prašine, čini opasnost od eksplozije ako je koncentracija uzvitrane prašine iznad DGE. Primarno su ugroženi prostori u kojima se pojavljuju oblaci prašine (presipna mjesta, cikloni, transporteri, silosi i sl.).

Kod nataložene prašine potrebno je posebno uzeti u obzir činjenicu da mali trajni izvor ispuštanja, odnosno trajni izvor ispuštanja s vrlo malim količinama ispuštanja u jedinici vremena može, kroz dovoljno dugo vremensko razdoblje, stvoriti nataložene slojeve prašine.

Opasnosti od eksplozije uzrokovane nataloženom prašinom učestalije su u industrijskim postrojenjima zbog:

- zagrijane površine na kojoj se prašina taloži, a iznad temperature tinjanja može doći do zapaljenja sloja prašine;
- uzvrtlavanja nataložene prašine koje se može pojaviti iz drugih razloga, npr. ventilacije, procesa ili mehaničkim uzvrtlavanjem, a što može tvoriti eksplozivnu atmosferu.

Nataloženi slojevi čine tri vrste opasnosti:

- 1) Primarna eksplozija unutar određenog prostora može raspršiti nataložene slojeve prašine u oblake te izazvati mnogo razornije sekundarne eksplozije. Slojevi prašine moraju uvijek biti pod nadzorom kako bi se navedena opasnost smanjila.
- 2) Nataloženi slojevi prašine mogu se zapaliti uslijed isijavanja topline s površina rotacijske opreme na kojima su nataloženi. Taj proces može biti dugotrajan i u tom je slučaju jače naglašen rizik od požara nego od eksplozije, ukoliko u prostoru nema oblaka ili drugih zapaljivih tvari, npr. plinova ili para.
- 3) Nataložena prašina može se podići u zrak te tako stvoriti oblak koji se može zapaliti u dodiru s vrućom površinom, a zatim izazvati eksploziju. U stvarnosti su temperature paljenja oblaka prašine često mnogo više od temperatura tinjanja sloja prašine. Npr. ugljen ima temperaturu tinjanja sloja 170 °C, dok je temperatura paljenja oblaka 610 °C.



### 3. UZROČNICI PALJENJA EKSPLOZIVNE ATMOSFERE

Prema već opisanim uvjetima, uzročnik paljenja eksplozivne atmosfere uzrokuje inicijalno paljenje eksplozivne atmosfere, ukoliko u trenutku pojave eksplozivne atmosfere sadrži dovoljnu toplinsku energiju i dovoljnu temperaturu u odnosu na minimalnu energiju i temperaturu paljenja. Oba uvjeta moraju biti ispunjena kako bi se izazvalo paljenje eksplozivne atmosfere. Ako je ispunjen samo jedan od uvjeta, do paljenja neće doći ma koliki bio drugi parametar. Uzročnici paljenja eksplozivne atmosfere koji se mogu pojaviti u industrijskim postrojenjima navedeni su u normi HRN EN 1127-1 [4].

Mnoge vrste strojne i električne opreme namijenjene uporabi u industrijskim postrojenjima s eksplozivnim atmosferama ne sadrže djelotvoran uzročnik paljenja pri normalnom radu. Ipak, postoji opravdani rizik da se u takvoj opremi pojavi neki uzročnik paljenja ako na gibajućim dijelovima opreme dođe do poremećaja ili do nenormalnog rada, odnosno pojave kvara.

U industrijskim postrojenjima u opremi postoji niz potencijalnih mjesta koja u radu ili pri određenim kvarovima mogu uzrokovati paljenje okolne eksplozivne atmosfere, odnosno mogu dovesti do eksplozije. Jedno od takvih potencijalnih mjesta u rotacijskoj opremi predstavljaju i kotrljajni kuglični ležajevi.

#### 3.1 Vruće površine kod plinova i para zapaljivih kapljevina

Površine tehnološke opreme često su vruće i neke od njih predstavljaju potencijalne uzročnike paljenja. Vruće površine uključuju:

- 1) vruću procesnu opremu i
- 2) strojeve u normalnom radu i s kvarovima.

Mnoga procesna oprema radi na visokim temperaturama. Strojevi u kvaru, kao što je npr. crpka s kvarom ležaja, mogu se zagrijati, a to vruće mjesto predstavlja potencijalnog uzročnika paljenja [73].

Do lokalnog paljenja dolazi dodiranjem zapaljive smjese i vruće površine. Proces koji se primjenjuje prilikom određivanja najniže temperature samozapaljenja (AIT), gdje vruća površina može izazvati paljenje, poznat je već duže vrijeme, ali potrebno je navesti da u praksi vruće površine zahtijevaju višu temperaturu za paljenje od temperature samozapaljenja. Međutim, pozornost je ovdje usmjerena na različitost između temperature vruće površine i temperature samozapaljenja (AIT), odnosno na temperaturno prekoračenje. Istraživanja su

pokazala da je to temperaturno prekoračenje funkcija samog materijala, površine i geometrije vruće površine, koncentracije plina ili pare, protoka fluida i uvjeta prijenosa topline. Neki plinovi koji su dosta korišteni u ispitivanju paljenja vrućom površinom su metan, propan, butan i pentan. Temperature samozapaljenja tih plinova jesu: metan 595 °C, propan 470 °C, butan 360 °C i pentan 285 °C. Istražena je temperatura paljenja smjese metana i zraka uporabom različitih materijala za vruću površinu i površine iznad 108 mm<sup>2</sup> i dobivene su vrijednosti od 897 °C do 1420 °C [78]. Učinak površine na vruću površinu istražili su Rae, Singh i Danson [79], koji su vrućoj površini izložili smjesu metana i zraka.

Djelovanje brzine strujanja plina istražili su Mullen, Fenn i Irby [80], koji su se usredotočili na paljenje plina koji struji preko štapa velikom brzinom kao kod mlaznog motora. Radeći sa smjesama pentana i zraka, otkrili su da temperatura paljenja raste s porastom brzine strujanja plina. Brzinu strujanja plina istražili su i Goodall i Ingle [81] koji su analizirali paljenje kerozina u zračnom tunelu. Temperature vruće površine potrebne da se izazove paljenje dobivene u tom istraživanju prikazane su u tablici 3.1.

**Tablica 3.1** Ovisnost brzine strujanja zapaljive tvari (plina) o temperaturi površine dostatne za paljenja

Brzina strujanja plina, m/s	Temperatura površine paljenja, °C
0,3	405
1,5	660
3,0	775

Vidljivo je da se s porastom brzine strujanja plina preko vruće površine povećava i temperatura paljenja.

No u praktičnom smislu, vrijednosti temperatura paljenja vrućom površinom plinova koje zahtijevaju višu temperaturu, kao i one koje imaju veće brzine strujanja, nemaju značenje, jer se u zaštiti i sigurnosti ljudi primjenjuje uvijek stroži kriterij. Zbog toga su vrijednosti paljenja plinova vrućom površinom definirane u stanju mirovanja. Paljenje vrućom površinom u biti je proces s dvije faze, s pokretanjem hladnog plamena u prvoj fazi, a nakon toga s „vrućim” paljenjem. Između paljenja i širenja postoji razlika. Širenje je ograničeno između granica paljenja (DGE i GGE), ali samozapaljenje nije ograničeno.

U određenim radovima [82] provedena su eksperimentalna istraživanja uređajem s vrućom površinom. Istraživanja su provedena na propanu, butanu i heksanu te dobiveni rezultati u

obliku dijagrama paljenja za te plinove. Dijagrami paljenja ukazuju na to da rezultati značajno ovise o konstrukciji uređaja.

### 3.2 Vruće površine kod prašina

Paljenje naslaga (slojeva) prašine među najučestalijim je uzrocima požara koji u industriji vrlo često dovode do eksplozija prašina [83]. U mnogim slučajevima zbog raznih okolnosti nije moguće djelotvorno ukloniti naslage zapaljivih prašina. U tim je slučajevima jedini način da se izbjegne paljenje sprečavanje zagrijavanja kućišta opreme iznad kritično opasnih temperatura [83]. Između parametara koji utječu na paljenje slojeva prašine su količina topline dovedene sloju, oblik površine ali i same značajke zapaljive prašine – najmanja temperatura pri kojoj dolazi do paljenja [83]. Prijenos topline uglavnom se događa kada je prašina nataložena na vrućoj horizontalnoj površini, a to je vrlo često kod strojne i električne rotacijske opreme u različitim termoenergetskim postrojenjima (ugljena prašina), prehrambenoj industriji (brašno, šećer), farmaceutskoj industriji i dr.

Tijek i način ispitivanja paljenja sloja prašine opisani su najnižom temperaturom paljenja sloja prašine, i to u Republici Hrvatskoj i Europi prema [84] i [85] u SAD-u prema [86]. Vrijednosti postignutih temperatura paljenja određenih prašina također su dobivene laboratorijskim ispitivanjima provedenim u Ex-Agenciji [21].

Temperature paljenja smjesa prašina i zraka koje se obično susreću, s relativnom vlažnosti od 30 % do 90 % jesu za:

- pšenično brašno od 410 °C do 430 °C,
- kukuruzni škrob od 410 °C do 450 °C,
- raženu prašinu od 430 °C do 500 °C.

Najviše žitnih i pšeničnih prašina može biti upaljeno ako su uspuhane preko vruće površine ležaja temperatura reda od 400 °C do 500 °C [28]. Zapravo i s temperaturama od približno 200 °C, prašine mogu biti zapaljene uz povoljne uvjete (niska relativna vlažnost, male čestice, visoka turbulencija i dr.) [28].

Najviša temperatura površine uređaja  $T_{\max}$  utvrđuje se postupkom ispitivanja bez prisutnosti prašine prema normi HRN IEC 61241-0 [87]. Najviša temperatura površine uređaja  $T_{\max}$  mora biti jednaka ili niža od najniže temperature tinjanja 5 mm debelog sloja razmatrane zapaljive prašine umanjene za 75 °C. Odnosno slijedi izraz za najvišu temperaturu površine uređaja  $T_{\max}$  :

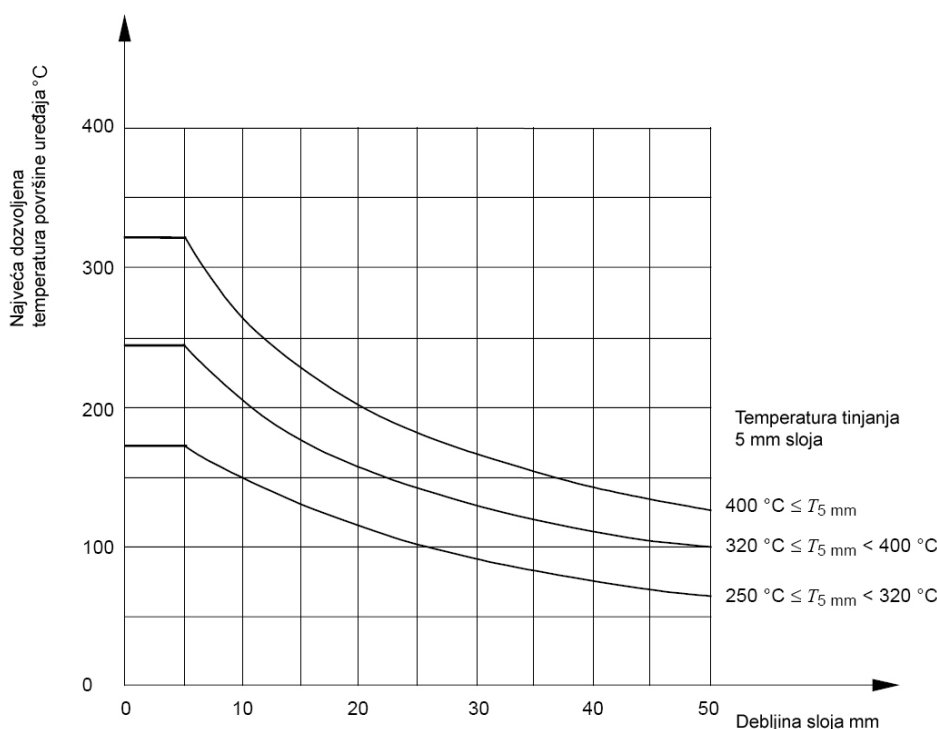
$$T_{\max} = T_{5\text{mm}} - 75 \quad (3.1)$$

gdje je:

$T_{5\text{mm}}$  - najniža temperatura tinjanja 5 mm debelog sloja prašine, °C

Na uređajima se mogu nataložiti slojevi prašine veće debljine (od 5 mm pa sve do 50 mm). U takvim okolnostima najviša dopuštena temperatura površine uređaja mora biti smanjena.

Kao pokazatelj može poslužiti slika 3.1 [3] koja prikazuje primjere smanjenja najviše dopuštene temperature površine uređaja upotrijebljenih u prisutnosti prašine čija je najniža temperatura tinjanja 5 mm sloja jednaka ili viša od 250 °C, u omjeru na povećanje debljine sloja.



**Slika 3.1** Smanjenje najviše dopuštene temperature površine uređaja u omjeru na povećanje debljine slojeva prašine

Za određivanje najniže temperature tinjanja slojeva određene zapaljive prašine kao funkcije debljine slojeva, mora se provesti laboratorijsko ispitivanje.

Kod određivanja temperature paljenja oblaka prašine i određivanja temperature paljenja sloja prašine (tinjanjem), zbog različitosti parametara koji mogu utjecati na temperaturu (npr. veličina čestica, vlažnost i dr.), provode se laboratorijska ispitivanja za konkretne uzorke, odnosno za pojedine šarže prašine iz industrijskih pogona.

Konkretne dobivene temperature paljenja oblaka prašine i određivanja temperature paljenja sloja prašine (tinjanjem) prikazane su u tablicama 3.2 i 3.3, a dobivene su ispitivanjem u laboratoriju Ex-Agencije (Ex-Lab).

Sukladno nizu normi HRN EN 61241-1- „1”, „2” ili „3” [88], ispitivanje paljenja oblaka provodi se za granulaciju - 71  $\mu\text{m}$ , a ispitivanje temperature tinjanja sloja prašine provodi se za granulaciju - 200  $\mu\text{m}$ . No ukoliko se postupkom prosijavanja prašine ne mogu dobiti tražene granulacije, neophodno je prilikom provođenja ispitivanja navesti za koju se granulaciju ispitivanje provodi.

**Tablica 3.2** Temperature paljenja oblaka za različite vrste prašine u °C

Granulacija ( $\mu\text{m}$ )		Vrsta zapaljive prašine								
		Ugljen	Grafit (kalcinirani naftni koks)	Zeleni naftni koks	Drvo		Brašno	Mepron (stočna hrana)	Smeđi šećer	Polistiren (90 %, ostatak razni aditivi)
					Bukva	Hrast				
71	71	580	950	650	430	435	430	316	463	—
	200	—	—	—	—	—	—	—	—	430

**Tablica 3.3** Temperatura tinjanja sloja za različite vrste prašine u °C

Granulacija ( $\mu\text{m}$ )		Vrsta zapaljive prašine								
		Ugljen	Grafit (kalcinirani naftni koks)	Zeleni naftni koks	Drvo		Brašno	Mepron (stočna hrana)	Smeđi šećer	Polistiren (90 %, ostatak razni aditivi)
					Bukva	Hrast				
200	200	230	> 400	> 400	315	305	350	Tali se	Tali se na 175 °C	Tali se već na 140 °C

### 3.3 Raspodjela uzročnika paljenja

Statističke raspodjele uzročnika paljenja prikazuju raspodjelu uzročnika paljenja koji su doveli do paljenja eksplozivne atmosfere. Zapravo, oni daju jasan znak na koje se uzročnike paljenja eksplozivne atmosfere i elemente strojeva potrebno posebno fokusirati s uporabom mjera u cilju zaštite (tablica 3.4, 3.5, 3.6 i 3.8).

**Tablica 3.4** Učestalost uzročnika paljenja u eksplozijama plinova i para [89]

Uzročnik paljenja	Učestalost, %
vruće površine	20,8
plamen (općenito)	16,7
električni	16,7
samozapaljenje	14,5
statički elektricitet	12,5
trenje	8,4
vruće čestice	6,3
UNP (LPG)	4,1

Napomena: Učestalost je dobivena na temelju uklanjanja nepoznatih uzročnika paljenja

**Tablica 3.5** Učestalost uzročnika paljenja eksplozijama zapaljivih prašina prema HSE od 1979. do 1988. godine [90]

Uzročnik paljenja	Učestalost, %
trenje – mehanički kvar	18,0
samozapaljenje	17,0
plamen (gorući materijal)	15,0
krhotine metala	7,0
zavarivanje i rezanje	7,0
električna oprema	3,0
statički elektricitet	4,0
drugi	2,0
nepoznato	27,0

**Tablica 3.6** Učestalost uzročnika paljenja u eksplozijama [91]

Uzročnik paljenja	Učestalost, %
mehanički	36,6
ljudski faktor	24,2
vanjski uzročnik	14,0
kombinirani uzročnici	12,5
udari	5,7
kemijske reakcije	4,2
instrumenti	1,1
ostalo	1,8

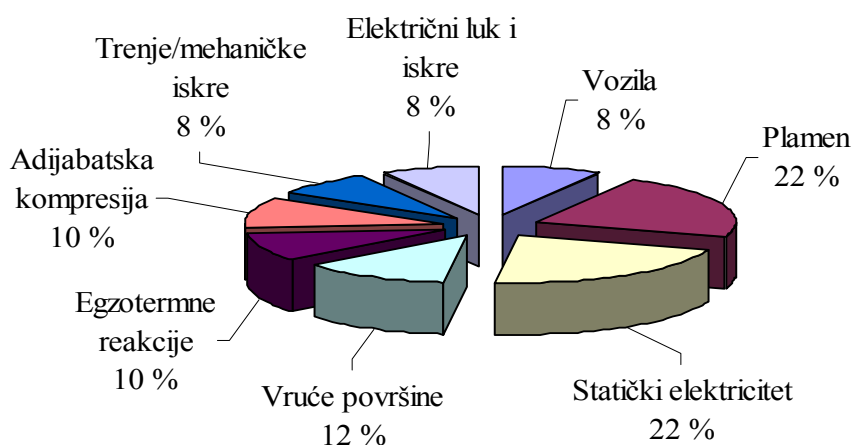
Razdioba učestalosti uzročnika paljenja dobivena na temelju 25000 požara pokazuje da su mehanički uzročnici paljenja kao što su vruće površine, mehaničke iskre i ležajevi kao element stroja prvi po učestalosti paljenja (tablica 3.7).

**Tablica 3.7** Učestalost uzročnika paljenja [92]

Uzročnik paljenja	Učestalost, %
mehanički (ležajevi, iskre, vruće površine)	32
električni	23
plamen	7
statički elektricitet	1
ostalo	37

**Tablica 3.8** Učestalost uzroka nesreća (s uzročnicima paljenja) u Meksičkom zaljevu [93]

Uzročnik paljenja	Učestalost, %
Ispuštanje plina	22,2
Vrući radovi	12,2
Mehanički kvar	9,8
Ispuštanje kapljevine	9,5
Kvar električnog uređaja	9,1
Istjecanje ulja iz motora ili prijenosnih kutija	3,7
Ispušni plinovi	2,4
Atmosferska pražnjenja	2,0
Otvoreni plamen	1,8
Mehanički udari	1,1
Statički elektricitet	0,5
Ostalo	25,7



**Slika 3.2** Učestalost uzročnika paljenja dobivena na temelju više studija [94]

Opsežna studija [6] kao i više studija [94] prikazuju vruće površine, mehaničko trenje i udare kao najznačajnije uzročnike paljenja eksplozivne atmosfere plinova i para u industriji s učestalošću od 30 % do 50 % (slika 3.2). Tolika velika učestalost već je postojana kroz određeno vrijeme bez tendencije pada i predstavlja nesumnjivo prvi i glavni uzročnik paljenja. Najveći broj nezgoda vezanih za paljenje eksplozivne atmosfere događa na procesnim postrojenjima (44 %), zatim u skladišnim postrojenjima (32 %) i tijekom transportne manipulacije (19 %) [91].

Određene studije [95] analiziraju posebno uzročnike u procesnim postrojenjima i u neprocesnim postrojenjima. Iz njih je vidljivo da su mehanički uzročnici paljenja (vruće površine i iskre nastale uslijed trenja) u procesnim postrojenjima najučestaliji sa 10,3 %, a u neprocesnim postrojenjima posjeduju učestalost od 5,9 %.

**Tablica 3.9** Učestalosti uzročnika paljenja u procesnim i neprocesnim postrojenjima [95]

Uzročnik paljenja	Učestalost u procesnom postrojenju, %	Učestalost izvan procesnog postrojenja, %
mehanički uzročnici (vruće površine i iskre nastale uslijed trenja)	10,3	5,9
električni	9,7	10,8
samozapaljenje	8,7	5,6
plamen	7,0	9,4
udari	-	7,0
nepaljenje	2,7	3,2
nepoznati	61,6	58,1



Nadalje, studija [95] analizira posebno uzročnike paljenja na kopnu (*eng.* on-shore) i na moru (*eng.* off-shore). Vidljivo je da su mehanički uzročnici paljenja (vruće površine i iskre nastale uslijed trenja) na kopnu najučestaliji sa 28,8 %, a na moru posjeduju učestalost od 18,6 %.

**Tablica 3.10** Učestalost uzročnika paljenja u procesnim postrojenjima na kopnu [95]

Uzročnik paljenja	Učestalost, %
mehanički uzročnici (vruće površine i iskre nastale uslijed trenja)	28,8
električni	27,3
samozapaljenje	24,2
plamen	19,7

**Tablica 3.11** Učestalost uzročnika paljenja u procesnim postrojenjima na moru [95]

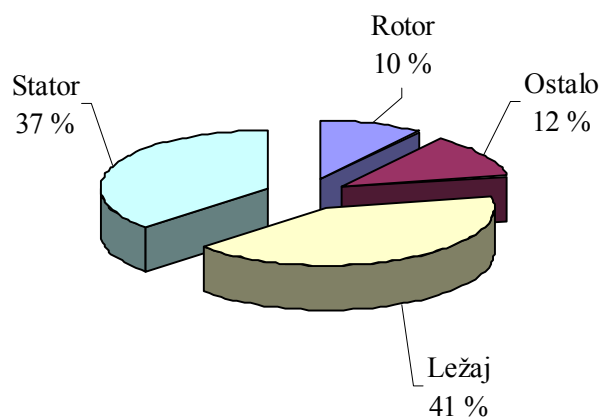
Uzročnik paljenja	Učestalost, %
električni	33,9
plamen	29,7
mehanički uzročnici (vruće površine i iskre nastale uslijed trenja)	18,6
samozapaljenje	17,8

Potrebno je napomenuti da se u studiji [95] navodi da je odstupanje između podataka navedenih u tablicama 3.9, 3.10, 3.11 i 3.15, a koji su navedeni za Veliku Britaniju i podataka koji su u Sjedinjenim Američkim Državama kao i ostatku svijeta vrlo mala, zapravo zanemariva.

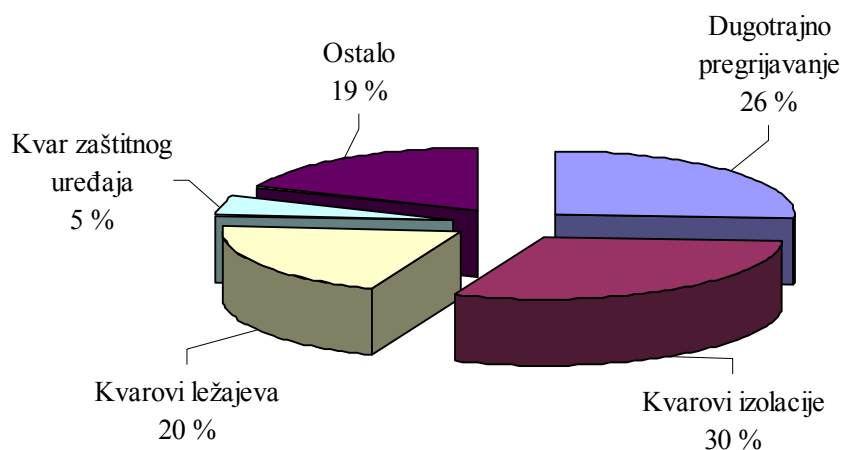
Kako bi se predstavio značaj razmatranja pojedinih uzročnika paljenja eksplozivne atmosfere, dovoljno je napomenuti da određeni elementi strojeva, a to se osobito odnosi na kotrljajne ležajeve, koji se nalaze u električnoj i strojnoj opremi značajno sudjeluju kroz kvarove kao potencijalni uzročnici paljenja. Kod strojne rotacijske opreme (crpke) prvi po učestalosti kvarova su kvarovi kotrljajnih ležaja. Slijede neuravnoteženost i ekscentričnost rotora [96].

Studijom [8] kojom se provelo ispitivanje na 6000 elektromotora, otkriveno je da mehanički kvar u elektromotoru sudjeluje s visokih 53 %. Svakako valja napomenuti da svaki kvar nastao u uređaju ne znači odmah i pojavu uzročnika paljenja, ali se zato kvarovi moraju razmatrati kao potencijalni uzročnici paljenja eksplozivne atmosfere. Nadalje, kotrljajni ležaj kao česti element strojeva u rotacijskoj opremi u svim kvarovima sudjeluje najznačajnije (npr.

kod elektromotora kvarovi na ležaju sudjeluju sa 41 % (slika 3.3), a prema nekim izvorima i s više od 50 % [8,10,11,97,98,99]).



**Slika 3.3** Učestalost kvarova u elektromotoru [10]



**Slika 3.4** Struktura učestalosti kvarova elektromotora u industrijskim postrojenjima [100]

Prema tvrci „ABB Group” učestalost kvarova ležaja od 20 % predstavlja značajnu učestalost u ukupnih kvarovima elektromotora ugrađenih u industrijskim postrojenjima (slici 3.4) [100]. U elektromotorima male i srednje snage do 150 kW uobičajeno se koriste kotrljajni kuglični ležajevi [101,102].

U eksplozivnoj atmosferi prašina, mehanički uzročnici paljenja čine od 33 % do 65 % svih uzročnika paljenja [12,13,14]. U eksplozivnoj atmosferi plinova i para kotrljajni ležajevi su prvi po učestalosti uzročnika paljenja (tablica 3.7) [92], a u eksplozivnoj atmosferi prašina ležaj je nakon plamena drugi najznačajniji uzročnik paljenja (tablica 3.12) [15,103].

**Tablica 3.12** Učestalost uzročnika paljenja (od 1988. do 1997.) nakon identificiranja uzročnika u 91 % od 129 eksplozija prašine [15]

Uzročnik paljenja	Učestalost, %
plamen	16
kvar ležaja	15
iskre	10
zavarivanje/rezanje	9
vruće metalne čestice	8
električni kvar	3
vanjski kvar (smetnja)	3
ostali	36

Kod rotacijske bi opreme, za sigurnost ljudi i zaštitu opreme, bilo nerazborito zanemariti uzročnike paljenja nastale kao posljedica mehaničkog kvara, bez obzira u kojoj rotacijskoj opremi nastali (strojnoj ili električnoj), jer se nastanak kvara može očekivati.

Eksplozije zapaljive prašine utjecajem mehaničkih uzročnika paljenja još su izraženije nego eksplozije plinova i para (tablica 3.13, 3.14 i 3.15).

**Tablica 3.13** Učestalost uzročnika paljenja u 426 eksplozija prašine u Saveznoj Republici Njemačkoj [12]

Uzročnik paljenja	Učestalost, %
mehanička iskra	26,2
tinjajuća gnijezda	11,3
mehaničko zagrijavanje i trenje	9,0
statički elektricitet	8,7
plamen	7,8
samozapaljenje	4,9
vruće površine	4,9
zavarivanje i rezanje	4,9
električni strojevi	2,8
nepoznato	16,0
ostali	3,5

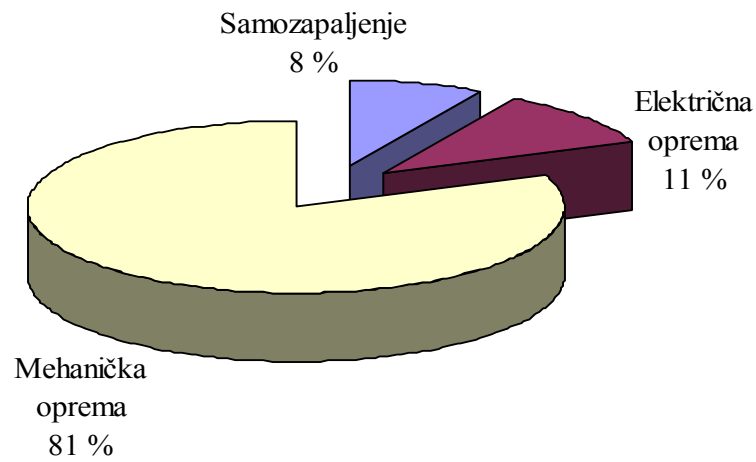
**Tablica 3.14** Učestalost uzročnika paljenja u eksplozijama zapaljive prašine u Saveznoj Republici Njemačkoj [104,105]

Uzročnik paljenja	Učestalost, %
mehanička iskra	30
nepoznato	11,5
mehaničko trenje	9
statički elektricitet	9
tinjajuća gnijezda	9
plamen	8
vruće površine	6,5
samozapaljenje	6
zavarivanje	5
električna oprema	3,5
ostali	2,5

**Tablica 3.15** Učestalost uzročnika paljenja u Velikoj Britaniji od 1979. do 1988. godine [106]

Uzročnik paljenja	Učestalost, %
trenje/mehanički kvar	18
samozapaljenje	17
plamen	15
metalne krhotine (iskre)	7
zavarivanje/rezanje	7
statički elektricitet	4
električni	3
ostali	2
nepoznato	27

U rudnicima ugljena (u periodu od 1992. do 2002. godine) najznačajniji uzročnik paljenja eksplozivne atmosfere je mehanička oprema [107] (slika 3.5) .



**Slika 3.5** Učestalost uzročnika paljenja u rudnicima ugljena u periodu od 1992. do 2002. godine [107]

#### 4. KOTRLJAJNI KUGLIČNI LEŽAJ

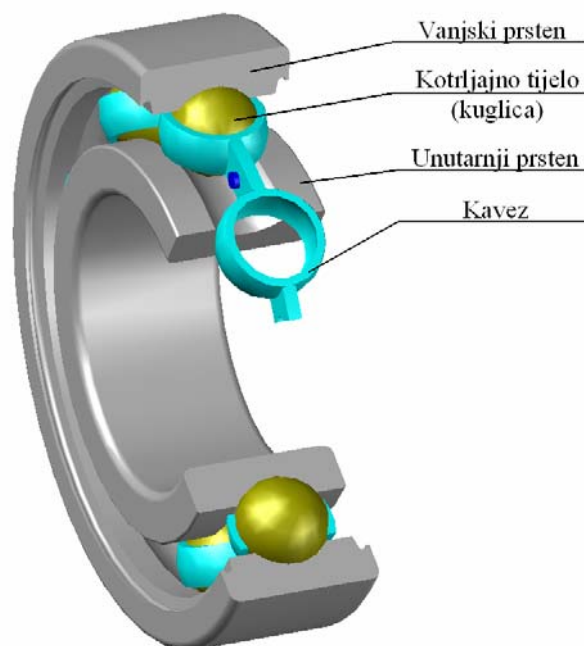
Ležajevi su elementi strojeva koji služe za vođenje pokretnih strojnih dijelova. Oni prenose opterećenja između dijelova koji se nalaze u međusobnom relativnom gibanju. Prema vrsti trenja, ležajevi se dijele na:

- klizne ležajeve, koji djeluju na principu trenja klizanja,
- kotrljajne ležajeve, koji djeluju na principu trenja kotrljanja.

Klizni ležajevi ušli su u uporabu pronalaskom kotača, dakle davno prije nove ere. Između dijelova u relativnom gibanju nalazi se tanki sloj ulja, tzv. uljni film, debljine reda veličine 2  $\mu\text{m}$  do 50  $\mu\text{m}$ . Kotrljajni ležajevi patentirani su 1794. u Engleskoj, a prvi put primijenjeni 1852. na pedalama za bicikl. Kod njih se između dijelova u relativnom gibanju (unutrašnjeg prstena vezanog za osovinu i vanjskog prstena vezanog za kućište) nalaze kotrljajna tijela.

Danas su zastupljenost i učestalost primjene kotrljajnih kugličnih ležajeva u rotacijskoj opremi (strojnoj i električnoj) vrlo raširene, više od bilo kojeg drugog kliznog ležaja. U praksi to znači da se klizni ležajevi primjenjuju jedino kod pojedinih kapitalnih („velikih”) jedinica kao što su to kompresori, plinske turbine, elektromotori i generatori vrlo velikih snaga, dok se u ostalim slučajevima primjenjuju kotrljajni ležajevi.

##### 4.1 Radijalni kotrljajni kuglični ležaj



**Slika 4.1** Radijalni kotrljajni kuglični ležaj

Radijalni kotrljajni ležajevi (slika 4.1) u osnovi su namijenjeni prenošenju radijalnih opterećenja, iako neke izvedbe omogućavaju i prijenos aksijalnih opterećenja. Međusobno se razlikuju prije svega prema obliku kotrljajnih tijela.

Kotrljajna su tijela jednostavnih geometrijskih oblika (kugla, valjak, krnji stožac i dr.), vođena u kavezu koji sprečava njihov međusoban dodir, a istodobno su jednakomjerno raspoređena po obodu ležaja. U praksi se od kotrljajnih ležajeva najviše upotrebljavaju kotrljajni kuglični ležajevi u kojima su kotrljajna tijela kuglice.

#### 4.2 Prikaz nazivlja u kotrljajnom kugličnom ležaju

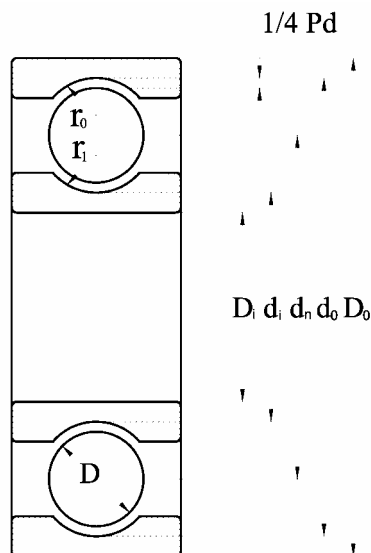
Promjer između osi kotrljajnih tijela (kuglica)  $d_n$  je prosječni promjer između unutarnje i vanjske kotrljajne staze ( $d_i$  odnosno  $d_o$ ) te je prikazan sljedećim izrazom:

$$d_n = \frac{1}{2}(d_i + d_o)$$

Dijametralna zračnost  $P_d$  prikazana je sljedećim izrazom:

$$P_d = d_o - d_i - 2D$$

Pojednostavljeni prikaz glavnih mjera kotrljajnog kugličnog ležaja prikazan je na slici 4.2.



**Slika 4.2** Glavne mjere u kotrljajnom kugličnom ležaju

Budući da su kotrljajni kuglični ležajevi konstruirani tako da imaju dijametralnu zračnost u neopterećenom stanju, ležaj može doživjeti aksijalni pomak. Aksijalna sloboda uzrokuje da

dodir kuglica-kotrljajna staza zamišlja jedan kosi kut s radijalnom plohom, pa je zbog toga dodirni kut različit od nula stupnjeva. Dodirni kut prikazan je izrazom:

$$\alpha = \cos^{-1}\left(1 - \frac{P_d}{2A}\right)$$

gdje je  $A$  prikazan izrazom

$$A = r_0 + r_1 - D$$

### 4.3 Učestalost oštećenja u kotrljajnom kugličnom ležaju

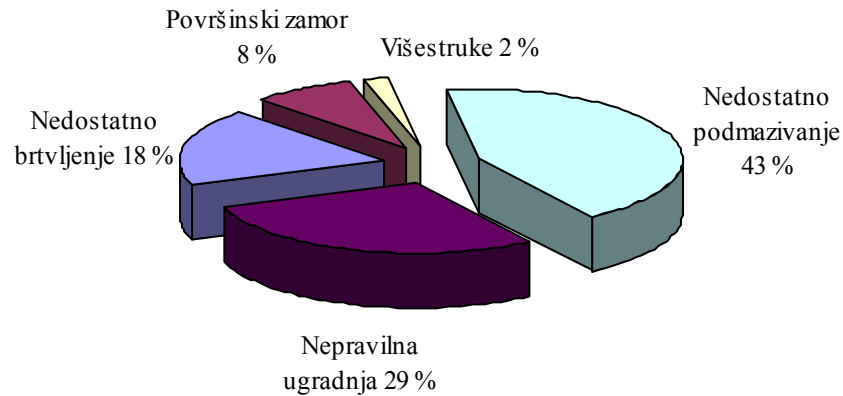
Višegodišnjim istraživanjima koje je provela tvrtka SKF o produženju životnog vijeka ležaja utvrđeno je da samo 25 % postojanosti ležaja ovisi o njegovoj kvaliteti. Ostali parametri kao što su montaža, podmazivanje, redovno i pravilno održavanje u stvari imaju najveći utjecaj na rad ležaja.

Prema [108], klasifikacija načina oštećenja koja se mogu pojaviti u kotrljajnim kugličnim ležajevima je sljedeća:

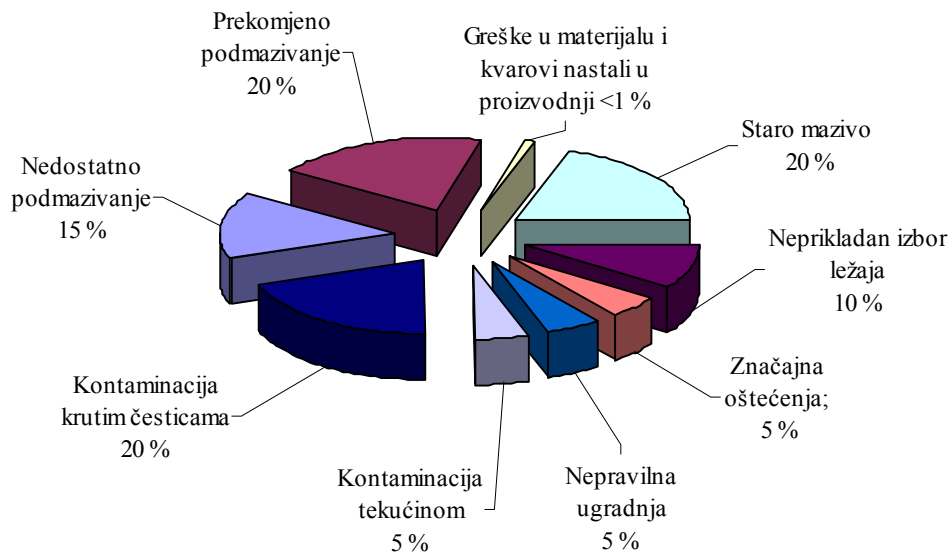
- a) Nepravilna ugradnja čini 16 % prijevremenih otkaza ležajeva. Posljedica je korištenja grube sile ili korištenja neadekvatnog alata prilikom ugradnje. Svako postrojenje traži specifičnu mehaničku, hidrauličku i toplinsku potporu za pravilnu montažu i demontažu ležajeva.
- b) Nepravilno podmazivanje uzrok je otprilike 36 % prijevremenih otkaza ležajeva. Posljedica je pogrešnog odabira sredstva za podmazivanje ili njegove pogrešne primjene.
- c) Kontaminacija (zagađenje) uzrokuje otprilike 14 % prijevremenih otkaza ležajeva. Posljedica je nezaštićenosti ležajeva i masti od zagađivača.
- d) Zamor uzrokuje otprilike 34 % prijevremenih otkaza kotrljajnih ležajeva. Posljedica je preopterećenja stroja, nepravilnog ili nedovoljnog održavanja, što se izravno odražava na ležajeve.

Učestalosti oštećenja u kotrljajnom kugličnom ležaju prema [109] prikazane su na slici 4.3, a prema [110] na slici 4.4.





**Slika 4.3** Uzroci oštećenja u kotrljajnom kugličnom ležaju [109]

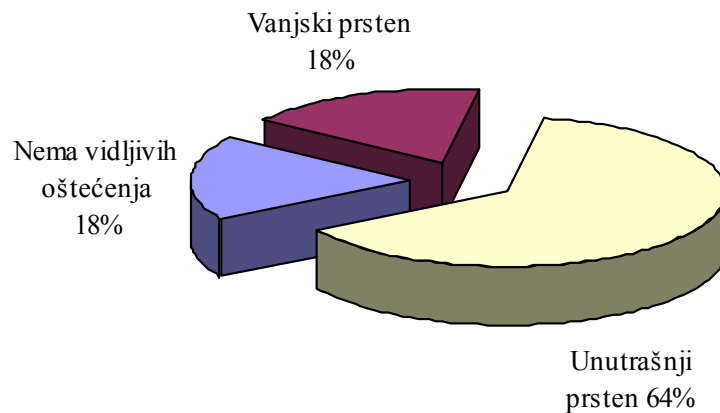


**Slika 4.4** Uzroci kvarova u kotrljajnim ležajevima [110]

Slika 4.5 [111] prikazuje udio oštećenja unutarnjeg i vanjskog prstena kotrljajnih ležajeva. Istraživanja pokazuju da je unutrašnja kotrljajna staza mnogo podložnija kvaru od vanjske ili od kotrljajnih elemenata ležaja [111]. U vezi s tim nameću se dva obrazloženja:

- 1) Rotacijska brzina kaveza prema vanjskoj stazi donekle je viša nego prema unutrašnjoj stazi. Kinetički omjeri prevode kuglicu preko unutrašnje staze učestalosti (frekvencijom) od otprilike 29 % višom od učestalosti kojom kuglica prelazi po vanjskoj stazi.

- 2) Dodirne sile na unutrašnjoj stazi koncentrirane su na manju površinu uslijed manjeg radijusa zakrivljenosti, zbog čega je naprezanje veće.



**Slika 4.5** Učestalost kvarova na unutarnoj i vanjskoj kotrljajnoj stazi kod kugličnih ležajeva [111]

Kod većine postrojenja koja kreću u rad, a posjeduju eksplozivnu atmosferu, za očekivati je da će početni kvarovi biti slabo izraženi. No kod postrojenja koja su u radu duže vrijeme s obzirom na starost instalirane rotacijske opreme, za očekivati je najčešće pojavljivanje vremenskih kvarova. Opisivanje vjerojatnosti pojave kvarova u rotacijskoj opremi s kotrljajnim kugličnim ležajevima može se prikazati i u obliku krivulje „kade“ (slika 4.6).

U prvom se razdoblju, analizirajući kvarove ispod krivulje, pojavljuju kvarovi koji su nastali od uhadavanja (početni kvarovi). Razdoblje normalne eksploatacije ima manju učestalost kvarova, čiji je intenzitet konstantan. U trećem razdoblju pojavljuju se vremenski kvarovi. Početni kvarovi nastaju kao posljedica loše konstrukcije, loše izabranog materijala, loše površinske ili toplinske obrade i dr. Vremenski kvarovi pojavljuju se u zadnjem razdoblju eksploatacije i nastaju kao posljedica starenja opreme. Najčešće se radi o starenju materijala, koroziji, zamoru, trošenju, povećanju zračnosti, itd.

Pretpostavimo da funkcija  $F(t)$  predstavlja distribuciju vremena do kvara neke komponente. Vjerojatnost kvara prije vremena  $t$  opisana je izrazom za nepouzdanost, uz pretpostavku da su  $F(0) = 0$  i  $F(\infty) = 0$ .

$$P(T \leq t) = F(t)$$

Pouzdanost je definirana kao vjerojatnost da komponenta ispravno funkcionira do trenutka  $t$ :

$$P(T \geq t) = 1 - F(t) = R(t)$$

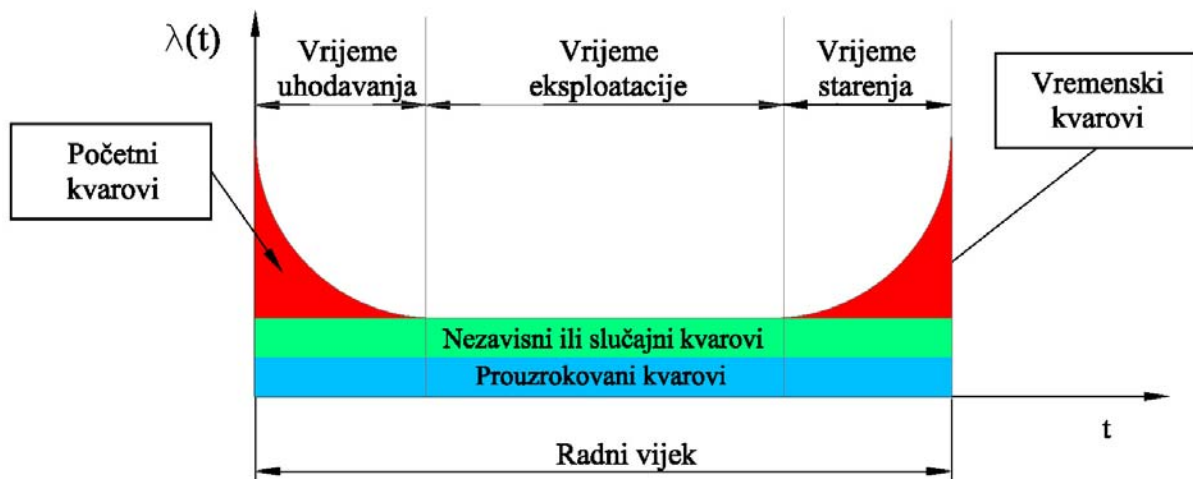
Tada  $f(t)$  predstavlja funkciju gustoće kvara, a površina ispod nje iznosi 1. Definirana je kao derivacija funkcije vjerojatnosti kvara po vremenu, odnosno derivacija funkcije pouzdanosti, a predstavlja ukupnu brzinu promjene kojom se događaju kvarovi komponenata ili ukupnu brzinu kojom se smanjuje pouzdanost komponente. Funkcija gustoće kvara matematički određuje slijedeći izraz :

$$f(t) = dF(t)/dt$$

Funkcija učestalosti ili intenziteta kvara promatrane komponente predstavlja broj kvarova u određenom vremenskom periodu, odnosno trenutnu brzinu kojom se zastoji događaju. Definirana je slijedećim izrazom:

$$\lambda(t) = f(t)/R(t)$$

Općenito, funkcija intenziteta kvara prezentira tri tipična oblika inherentnih kvarova prikazanih slikom 4.6; oblikom padajuće krivulje početnih ili inicijalnih kvarova, konstante slučajnih kvarova i rastućim oblikom krivulje kvarova uzrokovanih dotrajalošću i starenjem, dakle vremenskim kvarovima.



**Slika 4.6** Prikaz vjerojatnosti nastanka kvara u radnom vijeku kotrljajnog kugličnog ležaja

#### 4.4 Oštećenja nastala na dijelovima kotrljajnih ležajeva

I u povoljnim uvjetima uporabe kotrljajnih kugličnih ležajeva, oštećenja nastala zamorom materijala mogu se razviti na dijelovima kotrljajnih ležajeva u ovisnosti o naprežanju.

Oštećenja uslijed zamora materijala s pukotinama koje nastaju ispod razine površine vrlo su rijetka. Oštećenja uzrokovana zamorom materijala nastaju mnogo češće na površini komponenti u kotrljajnom dodiru, kao posljedica neprikladnog podmazivanja ili kontaminiranosti. Uzroke oštećenja ne može se prepoznati dugo, sve dok oštećenje ne uznapreduje. Zamor materijala može se prepoznati kao točkasto oštećenje u materijalu unutarne kotrljajne staze kugličnog ležaja (slika 4.7) ili na vanjskoj kotrljajnoj stazi ležaja (slika 4.8).



**Slika 4.7** Točkasto oštećenje nastalo zamorom na unutrašnjoj kotrljajnoj stazi kugličnog ležaja [110]



**Slika 4.8** Točkasto oštećenje nastalo zamorom na vanjskoj kotrljajnoj stazi kotrljajnog koničnog ležaja [110]

Oštećenja u kotrljajnim ležajevima mogu nastati i na kavezu ležaja. Uzroci prekida kaveza ležaja (slika 4.9) mogu biti kvarovi uzrokovani nepravilnom montažom ili prekoračenjem brzine ležaja; nadalje, mogu nastati kao rezultat trošenja uslijed oskudnog podmazivanja, uslijed prevelikog momenta opterećenja, prevelike zračnosti i dr.



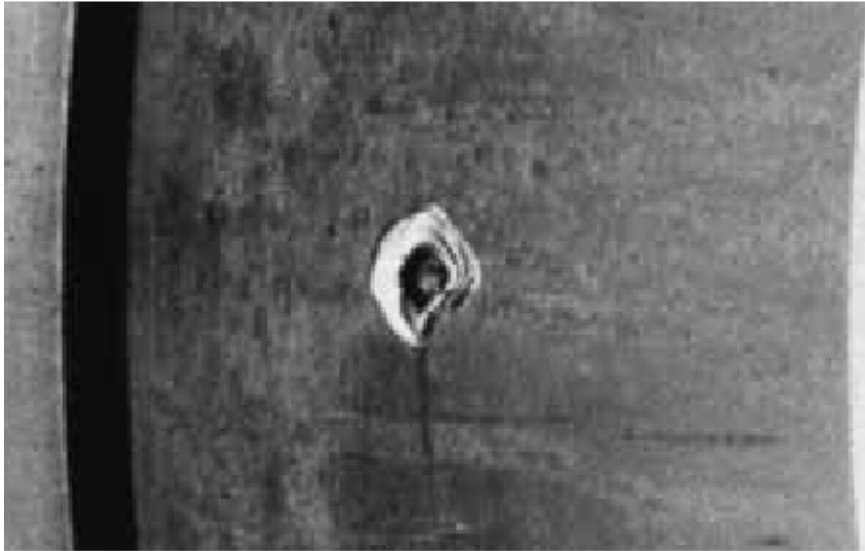
**Slika 4.9** Razoran prijelom kaveza kotrljajnog ležaja [110]

Oštećenja često nastaju prilikom nepravilne ugradnje i to kao izbrazdani ili deformirani kavez (slika 4.10).



**Slika 4.10** Metalni kavez s udubljenjima [110]

Oštećenje će se dogoditi kada električna struja prođe kroz ležaj, odnosno prilikom prijelaza od jednog do drugog prstena kroz kotrljajne elemente (slika 4.11). Zapravo je dodir površina u tom procesu sličan zavarivanju električnim lukom. Prolaz električne struje često dovodi do stvaranja nabora na kotrljajnim stazama ležaja. Čak su i struje male jakosti opasne.



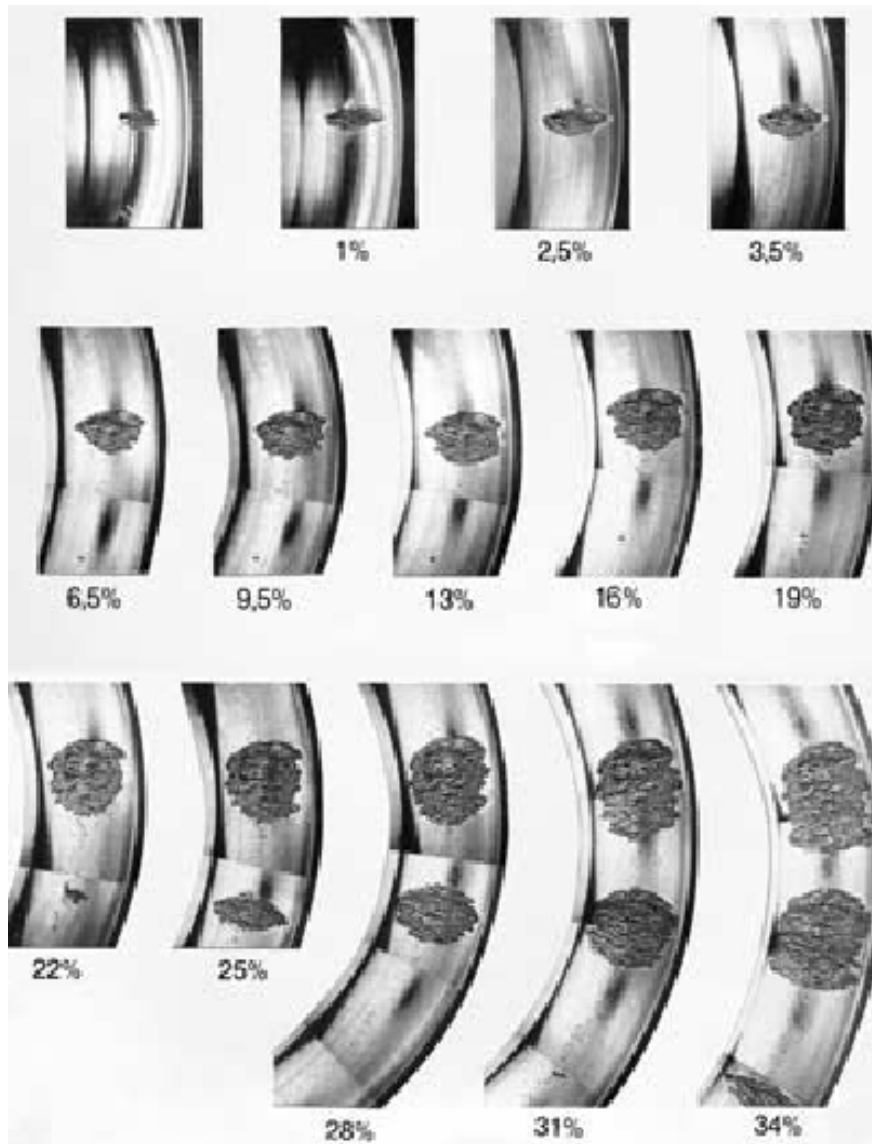
**Slika 4.11** Točkasto oštećenje ležaja nastalo prolaskom električne struje [112]

Ležajevi u stanju mirovanja mnogo su otporniji na oštećenja uzrokovana električnom strujom od ležajeva u gibanju (u radu). Veličina oštećenja ovisi o nizu čimbenika: jačini struje, trajanju opterećenja ležaja, brzini, mazivu i dr. Jedini način da se izbjegnu oštećenja nastala tim procesom je sprečavanje prolaska bilo koje struje kroz ležaj.

Kada oštećenje nastane na kotrljajnoj stazi, kavezu ili kotrljajnom tijelu, daljnjom uporabom ležaja oštećenje će se povećavati te će uzrokovati daljnja oštećenja. Na slici 4.12 prikazane su fotografije u periodičkim intervalima pregleda između oštećenja od početka nastanka te su izražene u postotku od nominalnog životnog vijeka  $L_{10}$ .

Neki od uzroka oštećenja kotrljajnih ležaja su [113]:

- premalo ili previše sredstva za podmazivanje,
- neprikladna vrsta sredstva za podmazivanje,
- prašina, vlaga i korozivna atmosfera,
- zagrijavanja ležaja (kondukcijom ili zračenjem od nekih susjednih izvora),
- visoka okolišna temperatura,
- preopterećenje (npr. prenapregnutim remenom, ekscentričnost, neuravnoteženost rotora ventilatora ili vibracije nastale od susjednih izvora),
- rad ventilatora većom brzinom od projektirane.



Slika 4.12 Razvoj oštećenja nastalog zamorom materijala na stazi unutarnjeg prstena [110]

#### **4.5 Zahtjevi na kotrljajne ležajeve u svjetlu današnjih zakonskih i normativnih dokumenata iz protueksplozijske zaštite**

Normativni dokumenti koji se odnose na primjenu konstrukcijskih mjera zaštite na rotacijsku opremu dijele se posebno na strojnu i na električnu opremu. Normativne dokumente vezane za električnu opremu izdali su svjetsko normizacijsko tijelo IEC-a i europsko normizacijsko tijelo CENELEC-a. Normativne dokumente vezane za strojnu opremu izdalo je prvenstveno europsko normizacijsko tijelo CEN. U novije vrijeme planira se izrada normativnih dokumenata zajednički predloženog tehničkog odbora od strane IEC-a i ISO-a.

Kako bi se razmotrili zahtjevi vezani za kotrljajne ležajeve u rotacijskoj opremi, potrebno je posebno napraviti presjek zahtjeva vezanih za kotrljajne ležajeve u električnim rotacijskim strojevima (elektromotorima), odnosno u strojnoj (mehaničkoj) opremi.

Zaštita od nastanka eksplozije ili protueksplozijska zaštita u industrijskim postrojenjima temelji se na zakonskim dokumentima. U Europi su to direktive poznate pod imenom „Atex” [58,59], a u Republici Hrvatskoj istoznačni pravilnici [60,61]. Zakonski dokumenti obavezuju ispunjenje zahtjeva vezanih za konstrukciju, procedure, ispitivanja te ispunjenje zahtjeva prije stavljanja opreme na tržište ili ispunjenje uvjeta za uporabu kod korisnika. Iako normativni dokumenti nisu obavezni, oni su ipak najkraći put za ispunjavanje uvjeta Europskih direktiva, odnosno u Republici Hrvatskoj važećih pravilnika.

Prema objašnjenjima u uvodnome dijelu za mjesta primjene protueksplozijski zaštićene opreme, zakonska regulativa određuje sljedeće skupine:

- skupine I – oprema za primjenu u rudnicima i
- skupine II – oprema za primjenu u industrijskim postrojenjima.

Nadalje, jedan od temeljnih zahtjeva zakonske regulative je pravilna uporaba opreme odgovarajućih kategorija u zonama opasnosti prema sljedećem:

- u zoni 0 uporaba opreme kategorije 1,
- u zoni 1 uporaba opreme kategorije 2 te
- u zoni 2 uporaba opreme kategorije 3.

U tablici 4.1 prikazane su obaveze zakonske regulative za primjenu pojedine kategorije opreme i skupine primjene u ugroženom prostoru (zonama opasnosti). Također su prikazani zahtjevi za kategoriju opreme u skladu s izvedbom zaštite (kvarova) i uvjetima rada prema [58, 59].



**Tablica 4.1** Različite skupine i kategorije opreme u skladu s izvedbom zaštite i uvjetima

Razina zaštite	Kategorija opreme		Izvedba zaštite	Ugroženi prostor (zona opasnosti)
	Skupina I	Skupina II		
vrlo visoka	M1	–	dva nezavisna načina zaštite ili sigurnost čak pri događaju dvaju nezavisna kvara	oprema prikladna za uporabu kad je prisutna eksplozivna atmosfera
visoka	M2	–	prikladna za normalan rad	oprema nije u uporabi kad je prisutna eksplozivna atmosfera
vrlo visoka	–	1	dva nezavisna načina zaštite ili sigurnost čak pri događaju dvaju nezavisna kvara	oprema prikladna za uporabu u zonama 0,1,2 i/ili zonama 20,21,22
visoka	–	2	prikladna za normalan rad i česta javljanja poremećaja ili kvarova opreme koji se normalno moraju uzeti u obzir	oprema prikladna za uporabu u zonama 1,2 i/ili zonama 21,22
normalna	–	3	prikladna za normalan rad	oprema prikladna za uporabu u zoni 2 i/ili zoni 22

Današnja se protueksplozijska zaštita (zaštita od eksplozije) u industrijskim postrojenjima, uz obavezu primjenu zakonske regulative, temelji na udovoljenju zahtjeva za primjenom posebno projektiranih uređaja [29,31,55,56] ili uporabi specijalnih osjetila za nadzor parametara kod uređaja i opreme [18, 57].

Usprkos visokoj zakonsko-normativnoj uređenosti, današnja koncepcija protueksplozijske zaštite u praktičnoj primjeni ukazuje na određene slabosti i nedostatke. Te su slabosti osobito vidljive u odnosu između malih zahtjeva normativnih dokumenata na kotrljajne kuglične ležajeve i prikaza učestalosti uzročnika paljenja djelovanjem mehaničkih uzročnika paljenja, odnosno kotrljajnih kugličnih ležajeva kod eksplozija koje su se dogodile.

#### 4.5.1 Zahtjevi na ležajeve kod električnih rotacijskih strojeva

Zahtjevi koji moraju zadovoljiti električni rotacijski strojevi u prostorima ugroženim eksplozijom prvenstveno ovise o eksplozijskim značajkama spomenutoga prostora, odnosno o rezultatima provedene klasifikacije prostora. Kako bi se objasnili zahtjevi koje moraju ispuniti ležajeve kod električnih rotacijskih strojeva, potrebno je napomenuti da protueksplozijski zaštićeni rotacijski strojevi prvenstveno moraju ispuniti opće uvjete za primjenu u ugroženom prostoru, a zatim i normativne dokumente vezane za pojedinu vrstu zaštite.

Norme vezane za električnu opremu su norme niza HRN EN (IEC) 60079 koje utvrđuju opće zahtjeve za konstrukciju, ispitivanje i označavanje električne opreme i komponenti namijenjenih uporabi u eksplozivnim atmosferama.

Elektromotori su najučestalija rotacijska električna oprema. Za primjenu u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom, elektromotori trebaju udovoljavati:

- a) općim zahtjevima [16], i jednom od vrsta protueksplozijske zaštite,
- b) oklapanje „d” [31] i/ili
- c) povećana sigurnost „e” [18].

Add a) Opći zahtjevi vezani za električnu opremu, pa time i za rotacijsku električnu opremu, dani su u normi HRN EN 60079-0 [16]. U toj su normi zahtjevi na temperaturu vezani za mjerenje temperature na najtoplijoj točki na kućištu. Zahtjev kod mjerenja temperature koji treba biti ispunjen je mjerenje uz napon napajanja između 90 i 110 % nazivnog napona električne opreme. Rezultat dobiven mjerenjem temperature površine ne smije prijeći temperaturni razred kod plinova i para. Kod prašina najviša temperatura površine rotacijske električne opreme ne smije prijeći temperaturu paljenja sloja ili oblaka prašine za koju je oprema namijenjena.

Jedini zahtjev na ležajeve u normi HRN EN 60079-0 navodi se u informativnom dijelu i odnosi se samo na mogućnosti prolaska električne struju kroz ležajeve (i to isključivo kod elektromotora koji se napajaju iz frekvencijskog pretvarača).

Add b) Određena rotacijska električna oprema, prvenstveno elektromotori, zaštićena je vrstom zaštite od eksplozije koja se naziva oklapanje i obilježava slovom „d”. Oklapanje „d” određeno je normom HRN EN 60079-1 [31] kao „vrsta zaštite kod koje su dijelovi koji mogu zapaliti eksplozivnu atmosferu smješteni u kućište koje može izdržati tlak koji se razvije tijekom unutrašnje eksplozije eksplozivne smjese i koje sprečava prijenos eksplozije na eksplozivnu atmosferu koja okružuje kućište”. U zaštiti oklapanjem temeljni su zahtjevi dani na tolerancije (u protueksplozijskoj zaštiti tolerancije se nazivaju raspori) između pojedinih dijelova kućišta uređaja. Ležajevi kod elektromotora zaštićenih oklapanjem mogu se nalaziti izvan ili unutar šticekog kućišta. Ukoliko se nalaze unutar kućišta, tj. s takvom zaštitnom mjerom i njihovo bi paljenje eksplozivne atmosfere ostalo zatvoreno unutar kućišta pa se eksplozija ne bi prenijela na okolni vanjski prostor. No konstrukcijska izvedba ležajeva unutar kućišta je rijetka pa velika većina rotacijske električne opreme (elektromotora) posjeduje

ležajeve koji se nalaze izvan zaštićenog kućišta, što znači da izravno utječu na vanjski prostor.

U normi HRN EN 60079-1 zahtjevi na ležajeve odnose se isključivo na ispunjenje zahtjeva vezanih za sastave, odnosno raspore. Sastav je određen kao mjesto gdje odgovarajuće površine dvaju dijelova jednog kućišta dolaze zajedno, ili gdje se kućišta spajaju, preko kojeg se sprečava prijenos unutrašnje eksplozije na eksplozivnu atmosferu koja okružuje kućište. Raspori u normi HRN EN 60079-1 označavaju razmak između odgovarajućih površina zaštitnog sastava kada je kućište električnog uređaja sastavljeno.

Add c) Rotacijsku električnu opremu moguće je zaštititi i vrstom zaštite od eksplozije koja se naziva „povećana sigurnost” i obilježava slovom „e”. Zahtjevi zaštite povećane sigurnosti navedeni su u normi HRN IEC 60079-7 [18], gdje je povećana sigurnost određena kao „vrsta zaštite električnih uređaja i komponenti u kojoj su primijenjene dodatne mjere koje osiguravaju povećanu sigurnost protiv mogućnosti povećanja temperature i nastajanja električnog luka i iskri u normalnom radu i određenim uvjetima koji ne spadaju u normalan rad”.

Zahtjevi na ležajeve kod rotacijske električne opreme u povećanoj sigurnosti vezani su isključivo na izračun najmanjeg radijalnog zračnog raspora, između statora i rotora (u aktivnom dijelu), kada rotacijski električni stroj miruje.

Na temelju gore iznesenih zahtjeva i uvjeta na ležajeve u normativnim dokumentima za rotacijsku električnu opremu, može se zaključiti da se ispunjavanjem zahtjeva normativnih dokumenata ne daje osobita pozornost ležajevima kao potencijalnim uzročnicima paljenja. Zapravo se ležajevi kod električne rotacijske opreme ne smatraju mjestima koja mogu generirati uzročnike paljenja eksplozivne atmosfere. Velika većina rotacijske električne opreme (elektromotora) u protueksplozijskoj zaštiti ne posjeduje ni jednu mjeru kontrole rada ležajeva, a time ni kontrolu nad njima kao potencijalnim uzročnicima paljenja.

#### **4.5.2 Zahtjevi na ležajeve kod mehaničkih rotacijskih strojeva**

Zahtjevi koji se postavljaju pred strojnu (mehaničku) rotacijsku opremu u prostorima ugroženim eksplozijom prvenstveno ovise o eksplozijskim značajkama spomenutoga prostora, odnosno o rezultatu provedene klasifikacije prostora. Zapravo, zahtjevi zakonske regulative [58-61] za uporabu isti su kao i kod električne rotacijske opreme. Kao i kod elektromotora,

mehanička rotacijska oprema također mora ispuniti opće zahtjeve za primjenu u ugroženom prostoru, a zatim i normativne dokumente vezane za pojedinu vrstu zaštite.

Opći zahtjevi vezani za strojnu, a time i rotacijsku opremu navedeni su u normi HRN EN 13463-1 [17]. U protueksplozijskoj zaštiti strojna (mehanička) oprema naziva se „neelektrična”, što je i povezano s prvotnim razvojem električne, a zatim i strojne opreme za prostore ugrožene eksplozivnom atmosferom. Pojam „neelektrična oprema” ujedno obuhvaća i hidrauličnu i pneumatsku opremu [17,114].

U normi HRN EN 13463-1 zahtjevi na temperaturu odnose se na najvišu temperaturu uređaja, pri čemu je također potrebno uzeti u obzir određene radne uvjete (npr. temperaturnu procesiranog fluida u crpki). Prilikom mjerenja temperature površine kod rotacijske strojne opreme, ona ne smije prijeći temperaturni razred kod plinova i para. Kod prašina najviša temperatura površine rotacijske mehaničke opreme ne smije prijeći temperaturu paljenja sloja ili oblaka prašine za koju je oprema namijenjena.

Rotacijska mehanička oprema zaštićena je sljedećim vrstama protueksplozijske zaštite:

- a) zaštita konstrukcijskom sigurnošću „c” [29],
- b) zaštita kontrolom uzročnika paljenja „b” [57],
- c) zaštita uranjanjem „k” [56], a
- d) ventilatori namijenjeni uporabi u eksplozijski ugroženom prostoru prema HRN EN 14986 [55].

Add a) Vrsta protueksplozijske zaštite strojne rotacijske opreme „konstrukcijska sigurnost” obilježava se oznakom „c” i određena je kao „vrsta zaštite u kojoj se konstrukcijske mjere primjenjuju kao zaštita od mogućeg paljenja djelovanjem vrućih površina, mehanički generiranih iskri i adijabatske kompresije uzrokovane pomičnim dijelovima”.

Zahtjevi na ležajeve u normi HRN EN 13463-5 odnose se na nazivni vijek trajanja ležajeva (prema ISO 281 [115]), ispravnu ugradnju ležajeva, zaštitu ležajeva od ulaza vode i krutih čestica (IP zaštita [116]), zaštitu ležajeva od električne struje te prikladnog podmazivanja.

U normi HRN EN 13463-5 također se navodi da trenutno ne postoji nikakvo prikladno eksperimentalno ispitivanje koje bi pokazalo da određeni tip ležaja ima mali rizik sa stanovišta postanka uzročnika paljenja. Nadalje, navodi se da vijek rada i održavanje ležaja uvelike ovise o uvjetima korištenja i zato ih nije moguće pouzdano izračunati.

Sve su to informacije koje mogu biti od presudnog značaja prilikom uporabe rotacijske mehaničke opreme u eksplozivnoj atmosferi.

Add b) Vrsta zaštite rotacijske mehaničke opreme kontrolom uzročnika paljenja obilježava se oznakom „b” i određena je kao „zaštita od paljenja koja se primjenjuje na jedan ili više potencijalnih uzročnika paljenja, pri čemu ugrađena osjetila otkrivaju opasan način rada koji može dovesti do paljenja i koji iniciraju kontrolne mjere prije nego potencijalni uzročnik paljenja postane djelotvoran”.

U normi se kao jedan od primjera ugradnje osjetila navode osjetila vibracija, koja detektiraju nenormalne vibracije koje se javljaju uslijed poremećaja npr. kotrljajnih ležajeva (što se najčešće očituje visokofrekventnim vibracijama), ili od rotirajućih dijelova koji gube dinamičku ravnotežu (što se najčešće očituje vibracijama niske frekvencije). Potrebno je navesti da se ta mjera zaštite strojne rotacijske opreme u praksi upotrebljava isključivo kod „velike” kapitalne opreme (npr. plinske turbine i sl.), kod koje je kvar financijski značajan. Kod „male” strojne rotacijske opreme ta se vrsta zaštite ne susreće.

Add c) Vrsta zaštite strojne rotacijske opreme uranjanjem obilježava se oznakom „k” i određena je kao „zaštita u kojoj su potencijalni uzročnici paljenja učinjeni nedjelotvornim ili odvojenim od eksplozivne atmosfere tako da su potpuno ili djelomično uronjeni u zaštitnu kapljevinu, a njihove su aktivne površine kontinuirano prekrivene zaštitnom kapljevom i to na takav način da eksplozivna atmosfera iznad kapljevine ili izvan kućišta opreme ne može biti zapaljena”. U normi se kao jedan od primjera takve zaštite rotacijske mehaničke opreme navode prijenosne kutije i reduktori. U zahtjevima te norme ne navode se nikakvi zahtjevi vezani za ležajeve.

Add d) Norma HRN EN 14986 opisuje zahtjeve za zaštitom ventilatora koji su namijenjeni uporabi u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferama plinova, para i prašina. Zahtjevi na ležajeve navedeni su u tč. 5.2.1.4, gdje se navodi da se treba udovoljiti zahtjevima točke 6. iz HRN EN 13463-5. Navodi se da za antifrikciju, ležajeve treba dizajnirati za rok trajanja  $L_{10}$  barem 20000 sati u skladu s ISO 281. Za ventilatore kategorije 2 (za uporabu u zoni 1/21), ležajevi moraju udovoljavati roku trajanja  $L_{10}$  koji nije kraći od 40000 sati. Preporučuju se ventilatori s izravnim pogonom (aksijalni ventilatori).

Nakon pregleda glavnih normativnih dokumenata koji se odnose na strojnu i električnu opremu u svjetlu zahtjeva na ležajeve, vidljivo je da se za njih ne postavljaju posebni uvjeti

osim u vrsti zaštite „b” (kontrola uzročnika paljenja). No kao što je i navedeno kod protueksplozijske zaštite „b”, osjetila se koriste jedino kod „velike” opreme i to isključivo strojne rotacijske opreme, dok kod električne rotacijske opreme to nije slučaj.

Ispunjenjem zahtjeva normativnih dokumenata koji se odnose na zaštitu od paljenja eksplozivne atmosfere rotacijske opreme, ne pridaje se dovoljna pozornost ležajevima kao uzročnicima paljenja.

Također i u literaturi [98,101] prilikom opisivanja vrsti protueksplozijskih zaštita oklapanje „d” i povećana sigurnost „e” ležajevi se ne navode kao mogući uzročnici paljenja razvojem vruće površine ili mehaničkih iskri. U vrlo rijetkoj literaturi [117] se navode neelektrični uzročnici paljenja koji postaju djelotvorni uz dovoljno veliku energiju i temperaturu (npr. kod pumpi, turbina i sl.).

#### 4.6 Temperatura u ležajevima

Vrijednost temperature pri kojoj kotrljajni ležajevi rade ovisi o mnogim parametrima između kojih su i:

- primijenjeno opterećenje,
- radna brzina,
- vrsta maziva i njegova reološka svojstva,
- način montaže ležaja i konstrukcija kućišta,
- radna okolina,
- promjena brzine okretaja (npr. kod frekvencijski reguliranih elektromotora).

U stacionarnim uvjetima rada kotrljajnih ležajeva tarna toplina treba biti odvođena. Sukladno tome, razine temperature u stacionarnom stanju jednog ležajnog sustava u usporedbi s drugim koji koristi identičnu veličinu i broj ležaja mjera su djelotvornosti toga sustava sa stanovišta odvođenja topline. [109]

##### 4.6.1 Generiranje tarne topline u kotrljajnim kugličnim ležajevima

Temeljni parametar koji se mora zadovoljiti kako bi kotrljajni ležaj bio uzročnik paljenja eksplozivne atmosfere jest taj da je zadovoljen uvjet dovoljne energije za paljenje i dovoljno visoke temperature. Najmanju energiju koju treba posjedovati kotrljajni kuglični ležaj kako bi bio djelotvoran uzročnik paljenja navedene su za plinove u tablici 2.2 i 2.4, a za prašine u tablici 2.3. Drugi uvjet koji treba biti zadovoljen za paljenje eksplozivne atmosfere u kotrljajnim ležajevima

jest temperatura. Temperaturu koju kotrljajni kuglični ležaj ne smije dostići u radu, za plinove i pare određena je temperaturnim razredima (tablica 2.6), a za prašine pomoću temperature paljenja oblaka i sloja (tablica 2.3).

#### 4.6.2 Radna temperatura kotrljajnih ležajeva

Dobro poznavanje generiranja topline, odnosno postizanja radne temperature u kotrljajnim kugličnim ležajevima važno je za konstrukciju ležaja, podmazivanje i brtvljenje. Brojni su pokušaji napravljeni za rješavanje temperature ležajeva u uvjetima stacionarnog stanja. Korištene su jednadžba toplinske ravnoteže i jednadžba za toplinu generiranu trenjem (proporcionalna brzini i opterećenju) do toplinskog prijelaza (proporcionalno temperaturnom porastu). No analitičko rješenje nije donijelo rezultat jednak stvarnoj radnoj temperaturi, zato jer koeficijent trenja ležaja i posebice koeficijent prijelaza topline nisu poznati s odgovarajućim stupnjem točnosti.

Iz tih razloga možemo koristiti samo aproksimacije srednje radne temperature ležajeva u svrhu projektiranja (konstrukcije) ležaja. Radna temperatura ležaja nije jednoznačno određena (nije uniformna). Mjesto najviše temperature je na spoju staza s kotrljajnim elementima. Na spoju s unutrašnjom stazom temperatura je viša nego na spoju s vanjskom stazom. Međutim, u svrhu konstrukcije dovoljna je srednja (približna) temperatura ležaja. Srednja temperatura ulja (maziva) manja je nego temperatura površine staze. Za zapaljenje eksplozivne atmosfere zapravo je bitno mjesto na kojem se postižu najviše temperature.

Za pojednostavljeno računanje moguće je odrediti srednju temperaturu ležaja, uzimajući u obzir gubitak snage trenja ležaja i prijelaza topline. Gubitak snage uslijed trenja raspoređen je u ležaju kao toplina i proporcionalan je produktu momenta trenja i brzine. Toplina neprestano prelazi izvan ležaja prijelazom (kondukcijom), zračenjem (radijacijom) i konvekcijom. Porast temperature ležaja iznad okolišne temperature odraz je mnogih čimbenika te je proporcionalan brzini ležaja i opterećenju.

#### 4.6.3 Određivanje temperature ležaja

Sljedeći izvodi korisni su za slučajeve gdje već postoje određena iskustva vezana za slične strojeve. Porast temperature može se predvidjeti kad god dođe do promjena u radu strojeva, kao

što su porast brzine ili opterećenja. Gubitak snage trenjem ležaja,  $\Phi$  može se izraziti pomoću tarnog momenta  $M_f$  i kutne brzine vratila  $\omega$  prema izrazu

$$\Phi = M_f \cdot \omega \quad (4.1)$$

Kutna brzina  $\omega$  može biti izražena kao funkcija brzine okretaja  $n$ ,  $\text{min}^{-1}$  prema:

$$\omega = \frac{n \cdot \pi}{30} \quad (4.2)$$

U uvjetima stacionarnog stanja, kad je uspostavljena toplinska ravnoteža, količina topline generirana trenjem,  $\Phi$  se odvodi u okoliš. Odvedena toplina ležaja se računa prema:

$$\Phi = K \cdot A \cdot (\vartheta_b - \vartheta_o) \quad (4.3)$$

gdje je:

$\Phi$  - gubitak snage trenjem ležaja, W

$\vartheta_b$  - temperatura ležaja, °C.

$\vartheta_o$  - okolišna temperatura, °C

$A$  - površina odvođenja topline,  $\text{m}^2$

$k$  - ukupni koeficijent prijenosa topline,  $\text{W}/(\text{m}^2 \text{ °C})$

U slučaju kada nema protoka maziva, sva je toplina odvedena preko površine ležaja (koja je u dodiru s vratilom i kućištem). Jednadžba izvedena iz izraza (4.1), (4.2) i (4.3) može se prikazati:

$$\vartheta_b - \vartheta_o = \frac{\pi \cdot n \cdot M_f}{30 \cdot k \cdot A} \quad (4.3)$$

Sukladno gornjem izrazu, porast temperature  $\vartheta_b - \vartheta_o$  proporcionalan je broju okretaja  $n$  i tarnom momentu  $M_f$ , a svi ostali uvjeti mogu se prikazati konstantom  $S$ , koja je funkcija koeficijenta prijelaza topline te geometrije i materijala ležaja i kućišta:

$$S = \frac{\pi}{30 \cdot k \cdot A} \quad (4.4)$$

zatim se izraz 4.3 može prikazati:

$$\Delta\vartheta = \vartheta_b - \vartheta_o = S \cdot n \cdot M_f \quad (4.4)$$

Moment trenja  $M_f$  je:

$$M_f = r \cdot \mu \cdot F \quad (4.5)$$

gdje je:

$M_f$  - moment trenja, N m

$\mu$  - faktor trenja



$r$  - radijus kotrljajnog dodira, m

$F$  - opterećenje ležaja, N

Porast temperature ležaja u izrazu (4.4) može biti izražen kao:

$$\Delta \vartheta = (\vartheta_b - \vartheta_o) = r \cdot S \cdot \mu \cdot n \cdot F \quad (4.6)$$

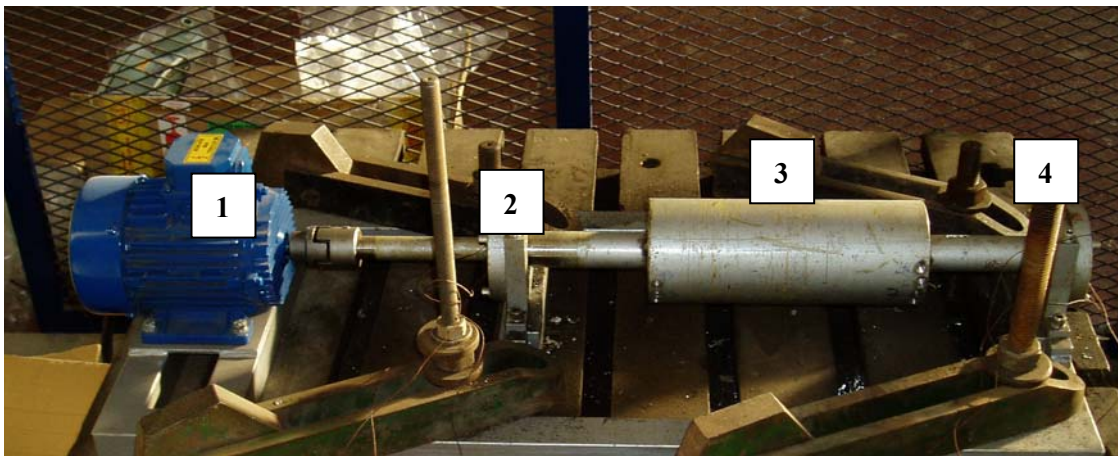
Kao rezultat toga, porast temperature  $\Delta \vartheta = \vartheta_b - \vartheta_o$  proporcionalan je faktoru trenja, brzini i opterećenju ležaja.

Predviđanje temperature ležaja može se dobiti određivanjem stacionarnih uvjeta temperature u probnom pogonu (eng. *test run*) i izračunom  $S$  i  $r$ . Ako je pretpostavljeno da je faktor trenja konstanta, onda izraz (4.6) omogućava određivanje sa zadovoljavajućom točnošću stacionarnog porasta temperature tog ležaja za ostale (druge) radne uvjete, pod različitim brzinama i opterećenjima.

## 5. EKSPERIMENTALNI RAD

### 5.1 Opis eksperimenta

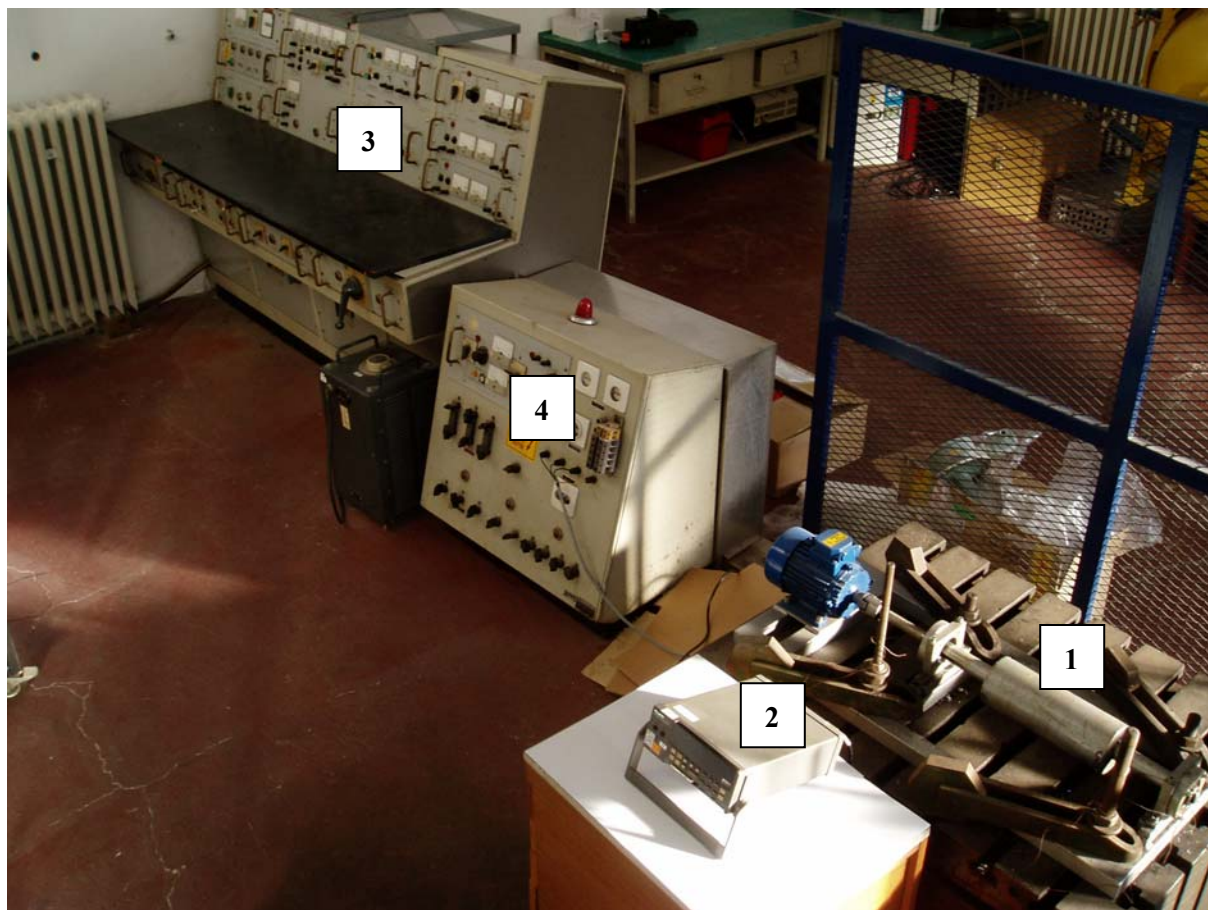
Eksperimentalni rad proveden je u laboratoriju Agencije za prostore ugrožene eksplozivnom atmosferom (Ex-Agencija) u razdoblju od veljače 2007. do lipnja 2008. godine. Pri planiranju eksperimentalnog rada, a na temelju postavljene hipoteze i ciljeva istraživanja te definiranog sustava istraživanja, oblikovan je ispitni sustav. Ispitni sustav izveden je s kotrljajnim kugličnim ležajevima kako bi se identificirao razvoj površina kritično visoke temperature kao uzročnika paljenja eksplozivne atmosfere. Ispitni sustav se sastoji od kotrljajnog kugličnog ležaja na kojem se provodi ispitivanje, rotacijske mase te ispravnog ležaja kao oslonca vratila (slika 5.1). Ispitni sustav se pogoni elektromotorom s konstantnim (nazivnim) brojem okretaja. Cilj istraživanja je prvenstveno analiza učinaka pojedinih oštećenja u kotrljajnim kugličnim ležajevima na početak pojave površina kritično visoke temperature kao najboljeg pokazatelja uzročnika paljenja eksplozivne atmosfere.



**Slika 5.1** Ispitni sustav: 1 – elektromotor, 2 – ispitivani kotrljajni kuglični ležaj SKF 6206, 3 – rotacijska masa, 4 – ležajni oslonac

### 5.2 Radno mjesto za provođenje ispitivanja uzoraka ležaja SKF 6206

Radno mjesto za provođenje ispitivanja uzoraka ležaja SKF 6206 prikazano je na slici 5.2. Postolje ispitnog sustava izvedeno je od kvadratnih čeličnih cijevi dimenzija 40x40 mm, zavarenih REL postupkom. Postolje ispitnog sustava pričvršćeno je stegama i osigurano od odvrtanja podložnim pločicama. Nakon prvotnog postavljanja ispitnog sustava na ispitni pult, do kraja ispitivanja nije ga se uklanjalo niti premještalo.



**Slika 5.2** Prikaz radnog mjesta za provođenje ispitivanja kotrljajnih kugličnih ležajeva: 1 – ispitni sustav, 2 – uređaj za pohranjivanje podataka temperature „Hydra-Fluke”, 3 – upravljački stol, 4 – napajanje električnom energijom

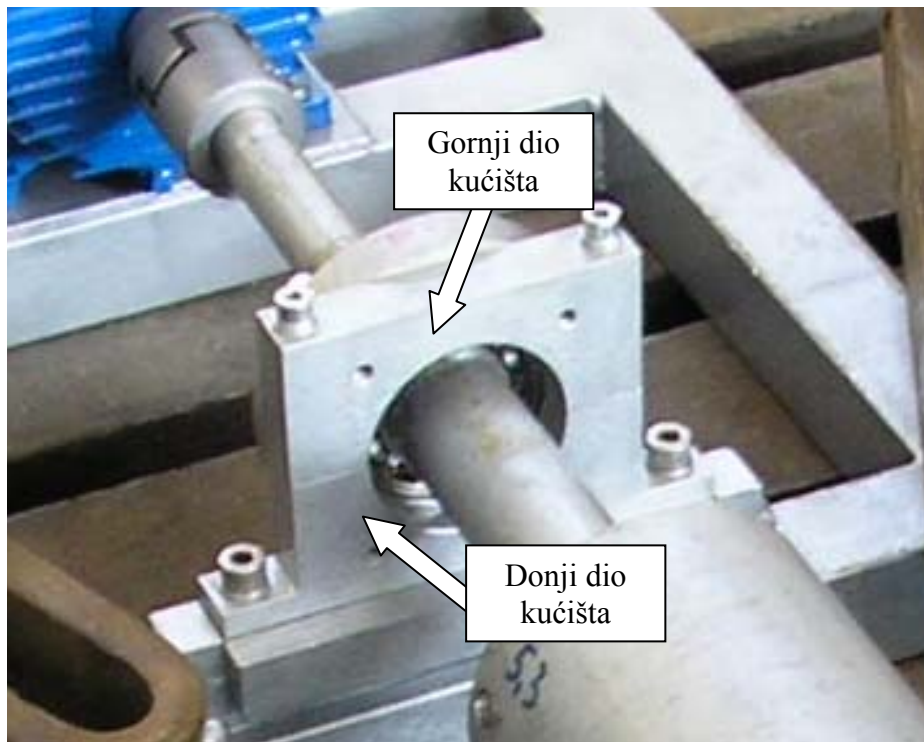
Za pogon ispitnog sustava s ispitivanim kotrljajnim kugličnim ležajevima koristio se elektromotor proizvođača „Končar-MES” (tablica 5.1).

**Tablica 5.1** Nazivni podaci elektromotora „Končar-MES”

Elektromotor „Končar-MES”	
tip	5,5AZ 71B-Z B3
napon	230/400 V,
struja	2,5/1,45 A
snaga	0,55 kW
nazivni broj okretaja	2750 min <sup>-1</sup>

Za prijenos snage s vratila elektromotora na ispitni sustav koristi se spojka proizvođača „Končar-MES”. Rotacijska masa nalazi se između dva kotrljajna kuglična ležaja SKF 6206 te je izvedena u obliku valjka dimenzija  $\text{Ø}100 \times 400$  mm. U prvom osloncu rotacijske mase (bližem elektromotoru) nalazi se ispitivani kotrljajni kuglični ležaj na kojemu su montirana osjetila. Kako bi se izbjegao utjecaj neuravnoteženosti (ekscentričnost) rotacijske mase na rezultate ispitivanja, provedeno je balansiranje.

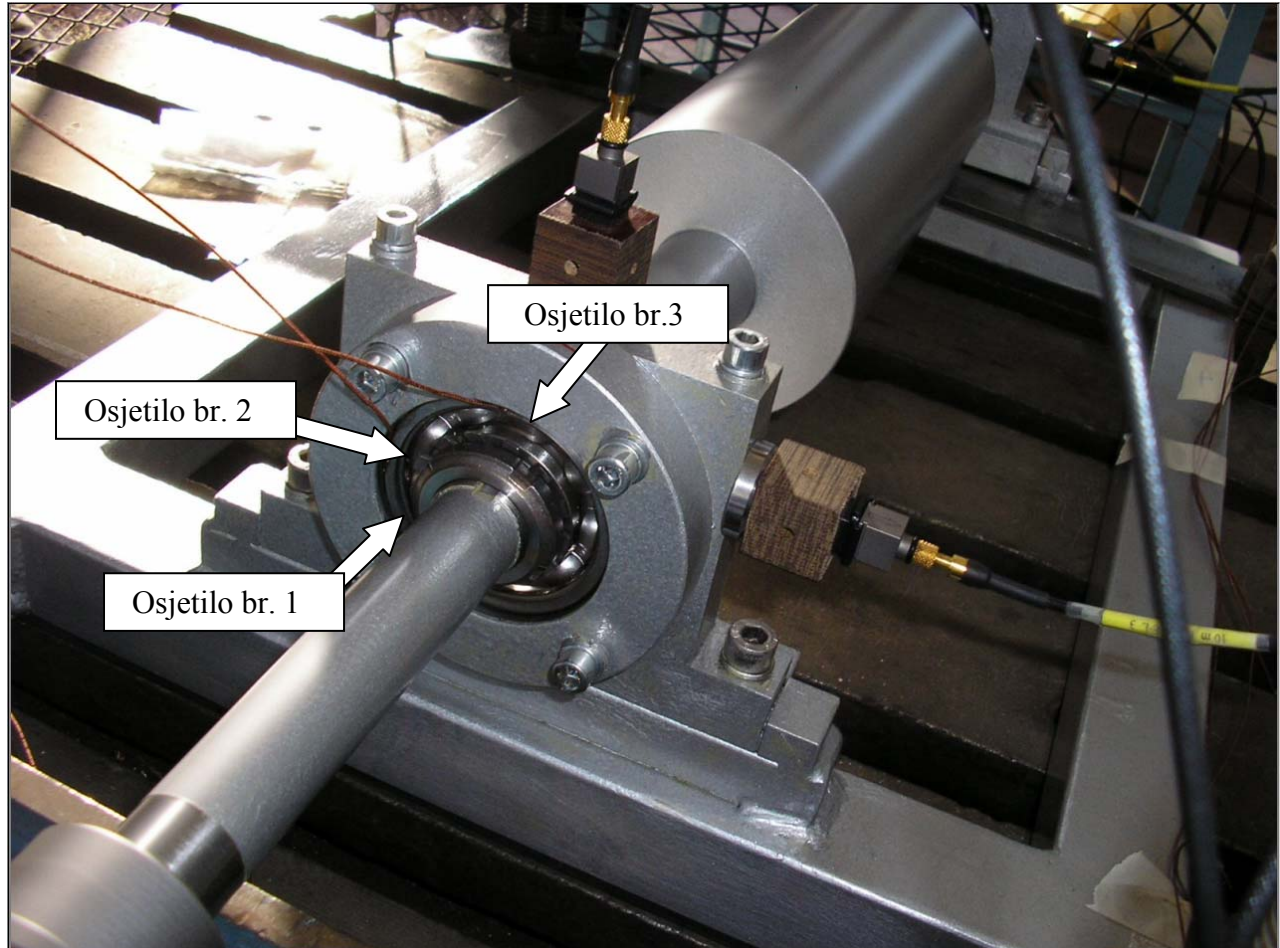
Tolerancije unutrašnjeg promjera ležajnog kućišta u koji se montira ispitivani uzorak ležaja izvedene su prema zahtjevima kataloga „SKF”-a za primijenjeni tip ležaja SKF 6206. Ležajno kućište sastoji se od dva dijela: gornjeg i donjeg dijela (slika 5.3). Posebno je važno da se vijci ležajnog kućišta nakon montaže ispitivanih uzoraka ležaja svaki put ispravno pritegnu jer intenzitet odvođenja topline ovisi svakako i o dodirnoj površini.



**Slika 5.3** Gornji i donji dio kućišta ispitivanog kotrljajnog kugličnog ležaja SKF 6206

Nakon montaže i pritezanja ležajnog kućišta s ispitivanim ležajem, pristupa se montaži osjetila temperature (termoparova) (slika 5.4). Osjetila (termoparovi) montiraju se na vanjski prsten kotrljajnog kugličnog ležaja u tri točke prema radnim uputama RU-048 [117] i RU-049 [118] laboratorija Ex-Agencije, koje definiraju način postavljanja termoparova prilikom mjerenja temperature protueksplozijski zaštićene opreme. Navedene radne upute opisuju

postavljanje temperaturnih osjetila (termoparova) prilikom ispitivanja zagrijavanja uređaja, u cilju određivanja najviših temperatura te u cilju određivanja mogućnosti paljenja eksplozivne atmosfere.



**Slika 5.4** Lokacije montaže osjetila temperature (termoparova)

Prije početka svakog ispitivanja provedena je kontrola ispravnosti uređaja za prikupljanje i pohranjivanje podataka temperature „Fluke–Hydra”, odnosno ispravnosti osjetila te djelotvornosti rada memorije za pohranjivanje podataka. Također je provedena kontrola ispravnosti učvršćenja osjetila temperature jer za vrijeme ispitivanja uslijed vibracija može doći do odvajanja osjetila pa bi svako naknadno postavljanje u radu moglo uzrokovati ozljedu. Pohranjeni podaci s memorijske kartice uređaja „Fluke – Hydra” (slika 5.5) preneseni su u prijenosno računalo pomoću programskog paketa proizvođača uređaja.



**Slika 5.5** Uređaj za pohranjivanje podataka vrijednosti temperature „Fluke – Hydra” s ispitivanog ležaja SKF 6206

U dijelu eksperimentalnog rada upotrijebljen je frekvencijski pretvarač za promjenu broja okretaja elektromotora (slika 5.6) .



**Slika 5.6** Frekvencijski pretvarač Končar tip: konvert midi

## 5.3 Izrada ispitivanih uzoraka

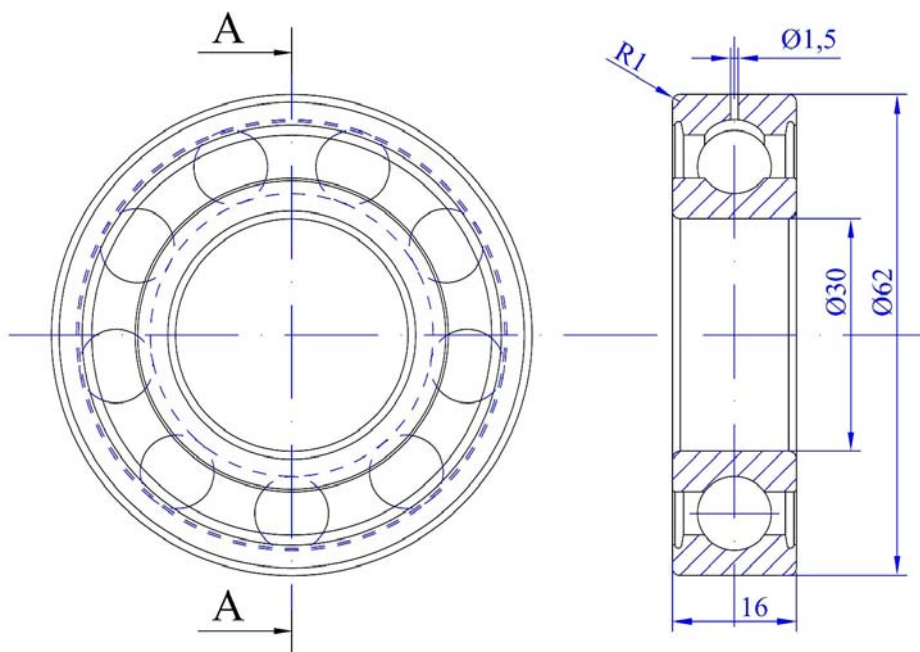
### 5.3.1 Ispitivani uzorci

Kao ispitivani uzorak na kojemu se provodi eksperimentalni rad u ovome istraživanju odabran je kotrljajni kuglični ležaj SKF 6206. Osnovne dimenzije kotrljajnog kugličnog ležaja SKF 6206 prikazane su u tablici 5.2.

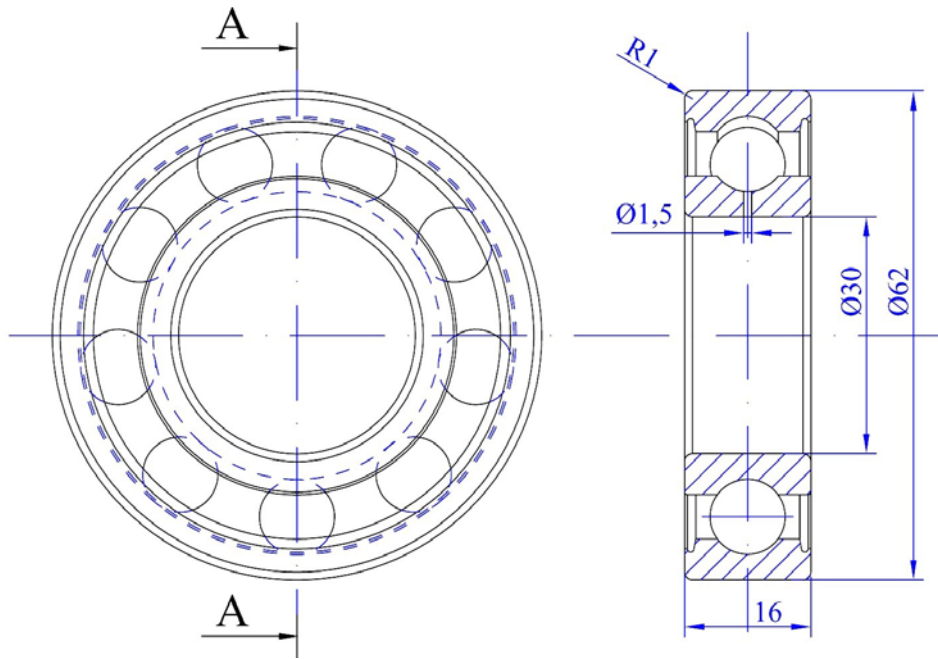
**Tablica 5.2** Dimenzije kotrljajnog kugličnog ležaja SKF 6206

Dimenzije kotrljajnog kugličnog ležaja SKF 6206, mm	
vanjski promjer	62
unutarnji promjer	30
širina	16
radijus ruba	1

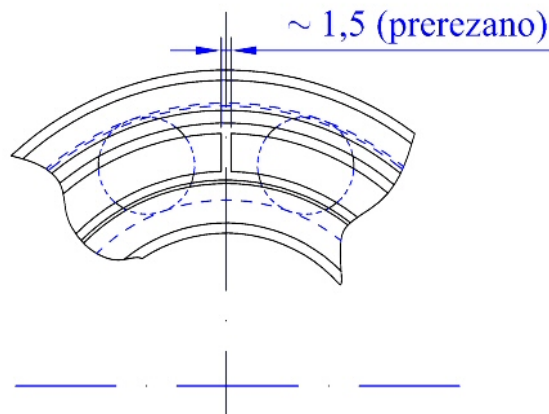
Kako bi se istraživanjem obuhvatili učinci pojedinog oštećenja u kotrljajnom kugličnom ležaju SKF 6206, izvedena su pojedinačna oštećenja vanjskog prstena (slika 5.7), unutarnjeg prstena (slika 5.8) i kaveza (slika 5.9).



**Slika 5.7** Dimenzije oštećenja vanjskog prstena kotrljajnog kugličnog ležaja SKF 6206



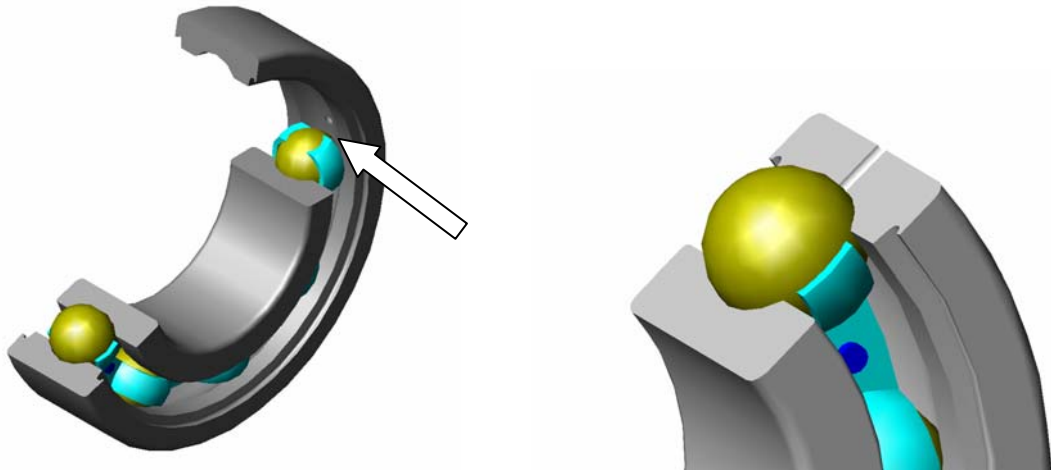
**Slika 5.8** Dimenzije oštećenja unutarnjeg prstena kotrljajnog kugličnog ležaja SKF 6206



**Slika 5.9** Dimenzije oštećenja kaveza kotrljajnog kugličnog ležaja SKF 6206

Za definiranje mjesta, veličine i izgleda oštećenja na pojedinim dijelovima kotrljajnog kugličnog ležaja, koristilo se iskustvima opisanih oštećenja u praksi koja su prikazana u točki 4.4. Oštećenja na vanjskom i unutarnjem prstenu te kavezu izvedena su kako bi se što vjerodostojnije simulirala oštećenja koja se pojavljuju u uporabi kotrljajnih kugličnih ležajeva. Kako bi se postigla što veća točnost u izradi oštećenja, sa što manjim utjecajem na rezultate ispitivanja, oštećenja su izvedena pomoću erozimatata. Pri tome je korištena elektroda promjera 1,5 mm i to za izradu točkastog oblika oštećenja na vanjskom (slika 5.10) i unutarnjem prstenu (slika 5.12) te na kavezu (slika 5.14). Oštećenje koje je izvedeno na kavezu sastoji se od prekida kaveza između dviju susjednih kuglica ležaja. Svako je oštećenje izvedeno na 20 komada kotrljajnog kugličnog ležaja SKF 6206.

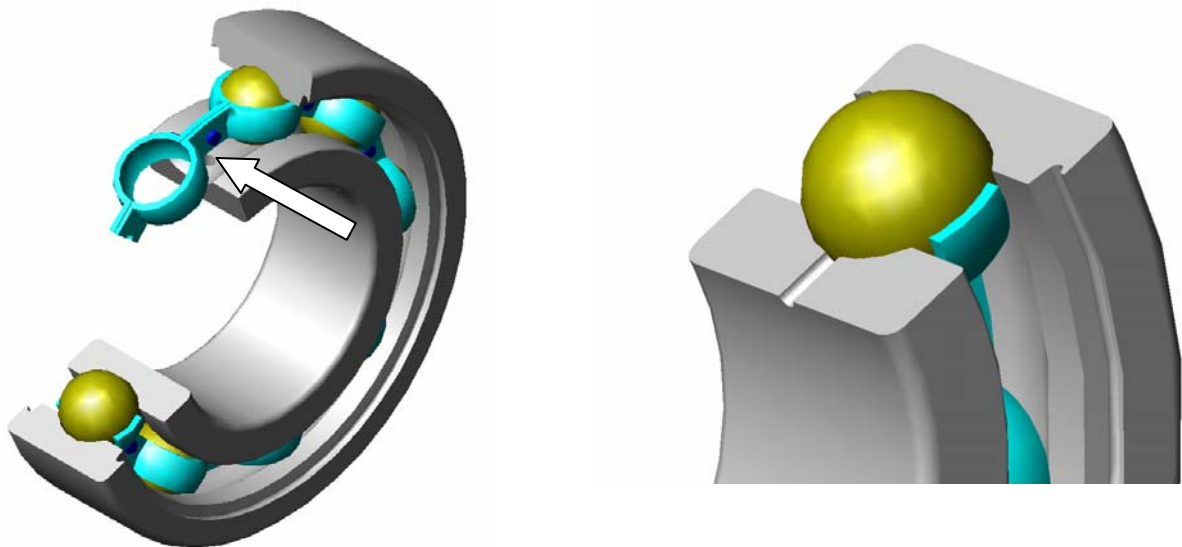




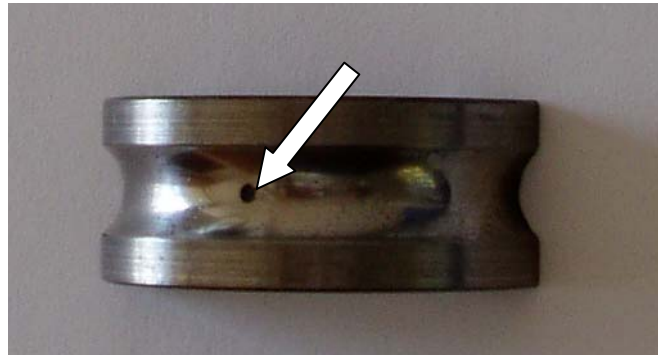
**Slika 5.10** Izgled oštećenja na vanjskom prstenu kotrljajnog kugličnog ležaja SKF 6206



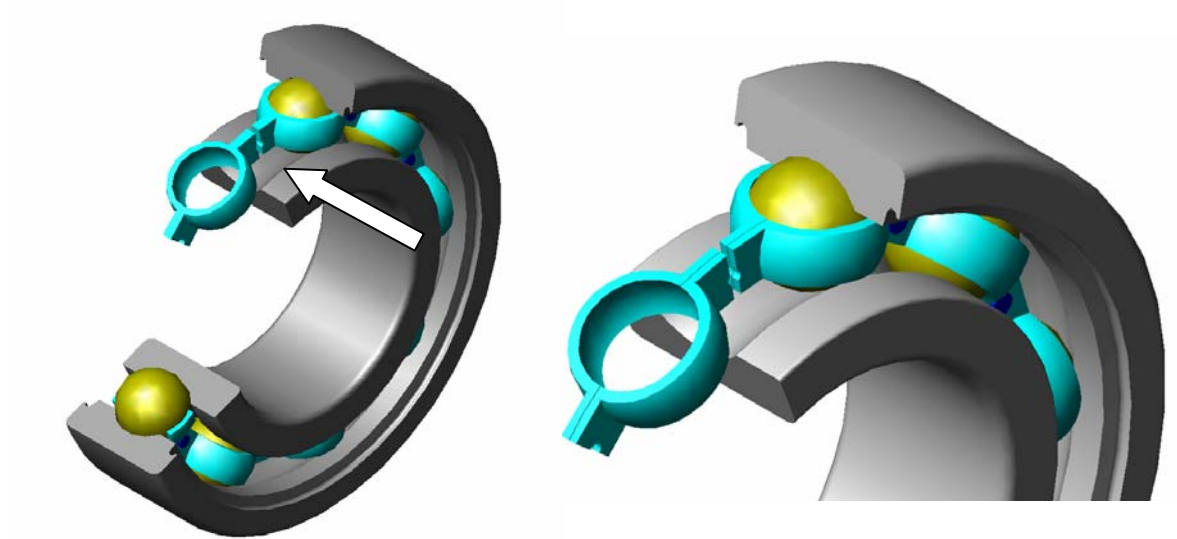
**Slika 5.11** Fotografija oštećenja na vanjskom prstenu kotrljajnog kugličnog ležaja SKF 6206



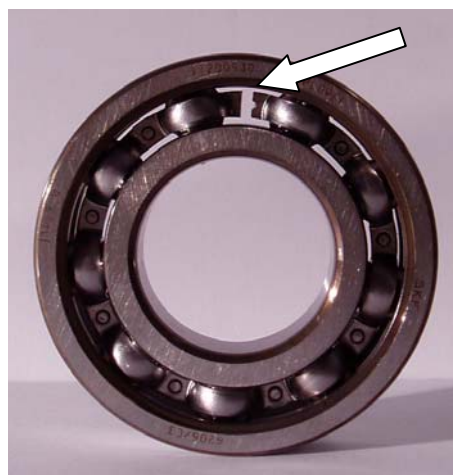
**Slika 5.12** Izgled oštećenja na unutarnjem prstenu kotrljajnog kugličnog ležaja SKF 6206



**Slika 5.13** Fotografija oštećenja na unutarnjem prstenu kotrljajnog kugličnog ležaja SKF 6206



**Slika 5.14** Izgled oštećenja kaveza kotrljajnog kugličnog ležaja SKF 6206



**Slika 5.15** Fotografija oštećenja kaveza kotrljajnog kugličnog ležaja SKF 6206

## **5.4 Kriteriji za analizu**

### **5.4.1 Usporedba rezultata ispitivanja prema temperaturi paljenja plinova i para**

Analizom rezultata ispitivanja provjeravaju se mogućnost i vremensko razdoblje u kojem je ispunjen uvjet da temperatura na ispitivanom kotrljajnom kugličnom ležaju SKF 6206 dostigne temperaturni razred, odnosno temperaturu paljenja pojedinog plina i pare. Usporedba izmjerenih temperatura ispitivanih kotrljajnih kugličnih ležajeva, što je i predmet istraživanja, provedena je prema vrijednostima temperatura paljenja plinova i para navedenih u normi HRN IEC TR 60079-20, odnosno pojedinih temperaturnih razreda. Iako su ispitivanja provedena u različitim vremenskim uvjetima okoliša laboratorija (prvenstveno različitim temperaturama okoliša), u analizi je uzimana nadtemperatura. Odnosno svaka očitana temperatura prilikom provedbe ispitivanja umanjena je za iznos temperature okoliša. Na taj je način uklonjen utjecaj temperature okoliša.

Temperaturni razredi kao mjerila najviše dozvoljene temperature površine opreme također vrijede za električnu i strojnu rotacijsku opremu koja se nalazi u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom.

### **5.4.2 Usporedba rezultata ispitivanja prema temperaturi paljenja oblaka i naslaga (sloja) prašine**

Prema već opisanom, temperatura paljenja oblaka i naslaga prašine ovisi o strukturi, vlažnosti, granulaciji i dr. Vrijednosti temperature u kotrljajnim kugličnim ležajevima koje su dobivene kao rezultat ispitivanja, uspoređene su s vrijednostima dobivenim ispitivanjem temperatura paljenja prašina provedenim u laboratoriju Ex-Agencije (ExLab) i navedenim u ispitnim izvješćima [21] kao i prema vrijednostima navedenim u [85].

Ispitna izvješća o temperaturama paljenja oblaka i sloja (naslage) prašina nastala su na temelju laboratorijske procedure Ex-Agencije (tj. ExLaba), odnosno normativnih dokumenata za ispitivanje eksplozijskih značajki prašina [84,119,120].

## 6. PROVEDBA ANALIZE REZULTATA ISPITIVANJA (rezultati ispitivanja, analiza i diskusija)

### 6.1 Predviđene analize

Analiza pojave povišene temperature kotrljajnog kugličnog ležaja SKF 6206 provedena je prema kriteriju lokacije oštećenja. Sukladno tome, svi ispitivani kotrljajni kuglični ležajevi SKF 6206 podijeljeni su u tri skupine, prema lokaciji oštećenja i to u:

- skupinu A – ležajevi s oštećenjem vanjskog prstena,
- skupinu B – ležajevi s oštećenjem unutarnjeg prstena,
- skupinu C – ležajevi s oštećenjem kaveza.

Svaka skupina ispitivanih kotrljajnih kugličnih ležajeva ima 20 uzoraka.

Cilj ovoga dijela istraživanja je utvrditi kakav utjecaj lokacija oštećenja ima na vrijednosti temperature prilikom otkaza (zaribavanja) kotrljajnog kugličnog ležaja. Vrijednost temperature u trenutku otkaza (zaribavanja) je bitna, jer uz termodinamičku energiju (toplinu) u kotrljajnom kugličnom ležaju tvori djelotvoran uzročnik paljenja eksplozivne atmosfere.

Nadalje, cilj je aproksimacija temperaturnih krivulja, koje nastaju prilikom otkaza kotrljajnog kugličnog ležaja, poznatim matematičkim funkcijama. Poznavajući matematičku funkciju, koja zadovoljavajuće opisuje krivulju otkaza ležaja, moguće je procijeniti vrijeme do pojave uzročnika paljenja eksplozivne atmosfere. Kao kriteriji uzročnika paljenja postavljeni su temperaturni razredi (odnosno temperature paljenja plinova i para) i temperature paljenja oblaka i naslaga (sloja) zapaljive prašine.

### 6.2 Podjela temperaturne krivulje za statističku analizu

U cilju određivanja trenutka pojave dovoljno visoke temperature za paljenja eksplozivne atmosfere kod ispitivanih kotrljajnih kugličnih ležajeva, a i kasnije aproksimacije statističkom obradom podataka te dobivenih temperaturnih krivulja, određene su vrijednosti koje definiraju područja na temperaturnim krivuljama. Te su vrijednosti sljedeće (slika 6.1):

$t_{po}$  - vrijeme do početka otkaza, min

$\mathcal{V}_{po}$  - temperatura početka otkaza, °C

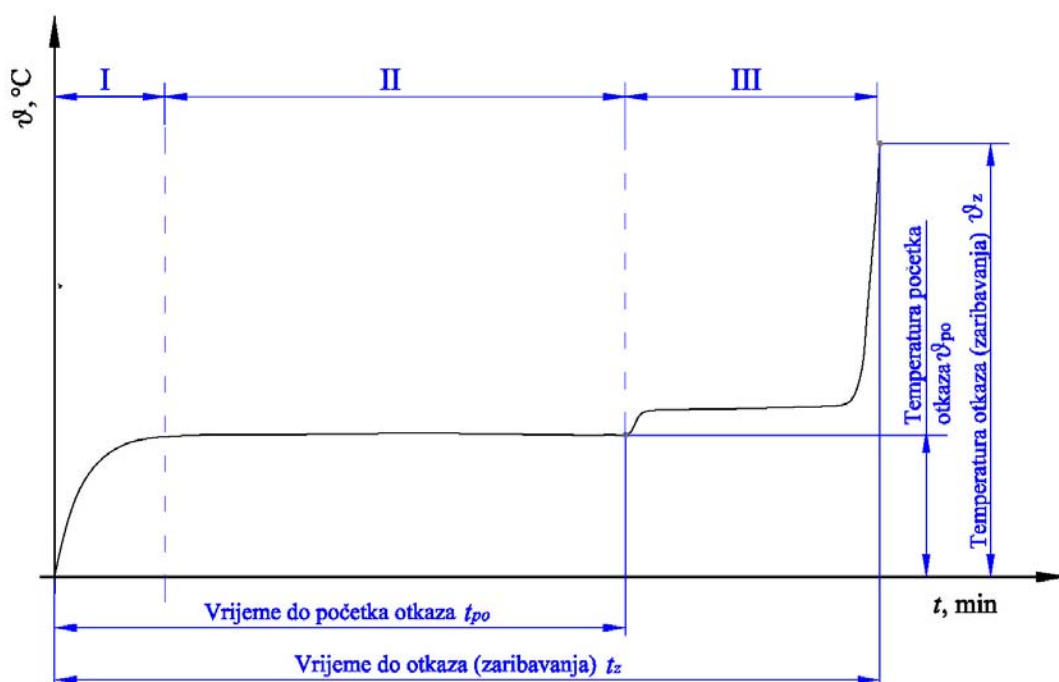
$t_z$  - vrijeme do otkaza (zaribavanja), min

$\mathcal{V}_z$  - temperatura otkaza (zaribavanja), °C

Razdoblja temperaturnih krivulja koja se statistički analiziraju, odvijaju se pri početku rada, pri stacionarnom radu te razdoblju otkazivanja ležaja. Podjela područja temperaturne krivulje provedena je na temelju promjene temperature od 3 °C. Zapravo, promjena temperature od 3 °C obično se smatra prikladnom kod ispitivanja razdoblja trajanja (izdržljivosti) [109].

Tako da se temperaturna krivulja može podijeliti na sljedeće (slika 6.1):

- I. Razdoblje početka rada – vrijeme od početka ispitivanja do točke na temperaturnoj krivulji kad se temperatura ustalila na promjenu manju od 3 °C;
- II. Razdoblje stacionarnog rada – vrijeme od točke na temperaturnoj krivulji koja označava završetak razdoblja početka rada do točke kad se pojavilo odstupanje promjene temperature veće od 3 °C;
- III. Razdoblje otkazivanja ležaja – vrijeme od točke na temperaturnoj krivulji koja označava završetak razdoblja stacionarnog rada do točke na temperaturnoj krivulji kod koje je došlo do otkaza (zaribavanja) ležaja;



**Slika 6.1** Tipični izgled temperaturne krivulje rada kotrljajnog kugličnog ležaja SFK 6206 s oštećenjem od trenutka kretanja u rad do trenutka otkaza (zaribavanja)

Pri provedbi eksperimentalnog rada s ispitnim sustavom za mjerenje promjene temperature određeno je vrijeme između snimanja dva podataka, od jedne minute te je tako ugođen uređaj „Fluke – Hydra”.

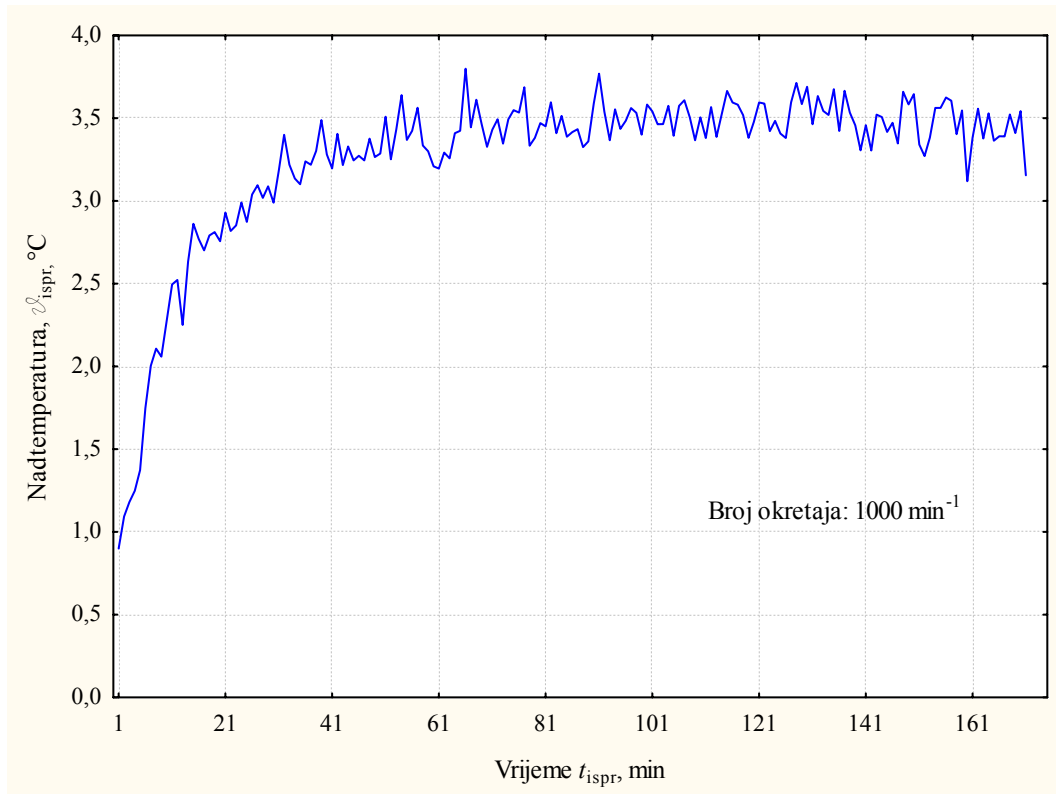
### **6.3 Rezultati mjerenja temperature ispravnog kotrljajnog kugličnog ležaja SKF 6206**

Kako bi se ispitne skupine A, B i C kotrljajnih kugličnih ležajeva SKF 6206 s oštećenjima mogle usporediti, provedeno je i ispitivanje ispravnog (bez oštećenja) kotrljajnog kugličnog ležaja SKF 6206.

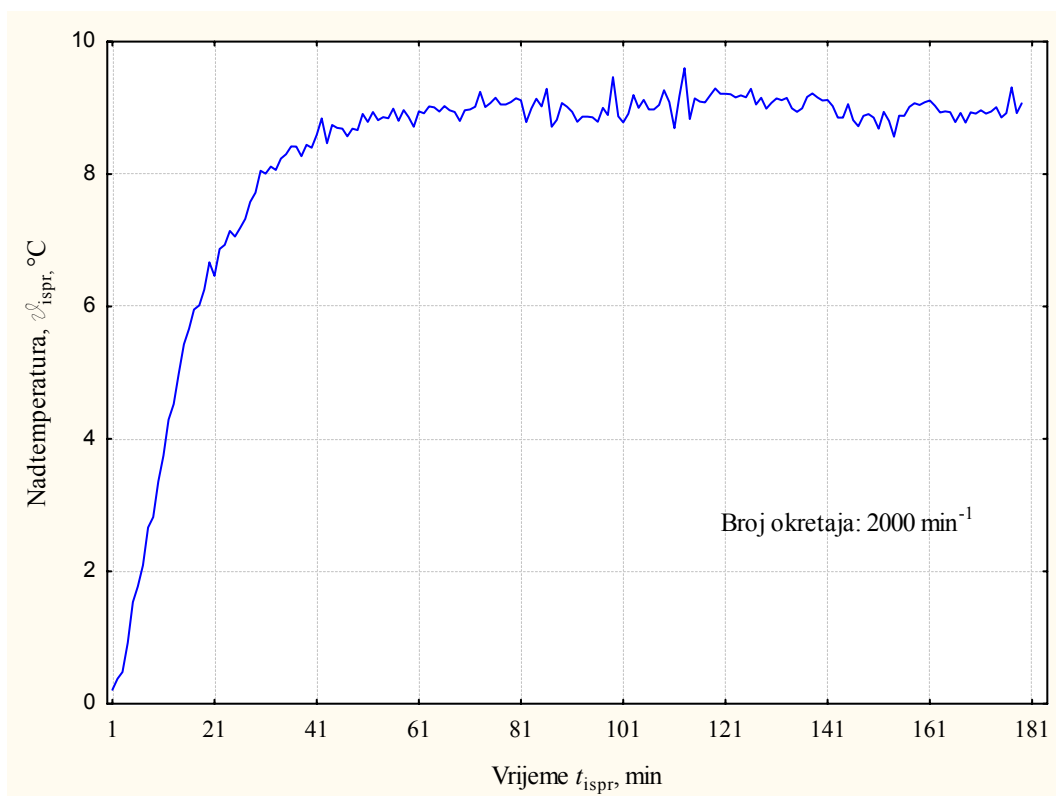
Potrebno je napomenuti da su na svim prikazima iskazane nadtemperature, odnosno temperature kugličnog ležaja umanjene za temperaturu okoliša koja je bila prilikom samog eksperimentalnog rada.

#### **6.3.1 Rezultati mjerenja temperature ispravnog kotrljajnog kugličnog ležaja SKF 6206 s konstantnim brojem okretaja**

Kotrljajni kuglični ležaj SKF 6206 bez oštećenja postavljen je u ispitni sustav, a zatim su pričvršćena osjetila (termoparovi) koja su povezani s uređajem za pohranjivanje podataka temperature („Fluke – Hydra”). Snimljene su temperaturne krivulje kotrljajnih kugličnih ležajeva bez oštećenja u ispitnom sustavu kod različitih brojeva okretaja koji su mijenjani pomoću frekvencijskog pretvarača. Brojevi okretaja na kojima su snimljene temperaturne krivulje su  $1000 \text{ min}^{-1}$  (slika 6.2),  $2000 \text{ min}^{-1}$  (slika 6.3) i  $3000 \text{ min}^{-1}$  (slika 6.4).



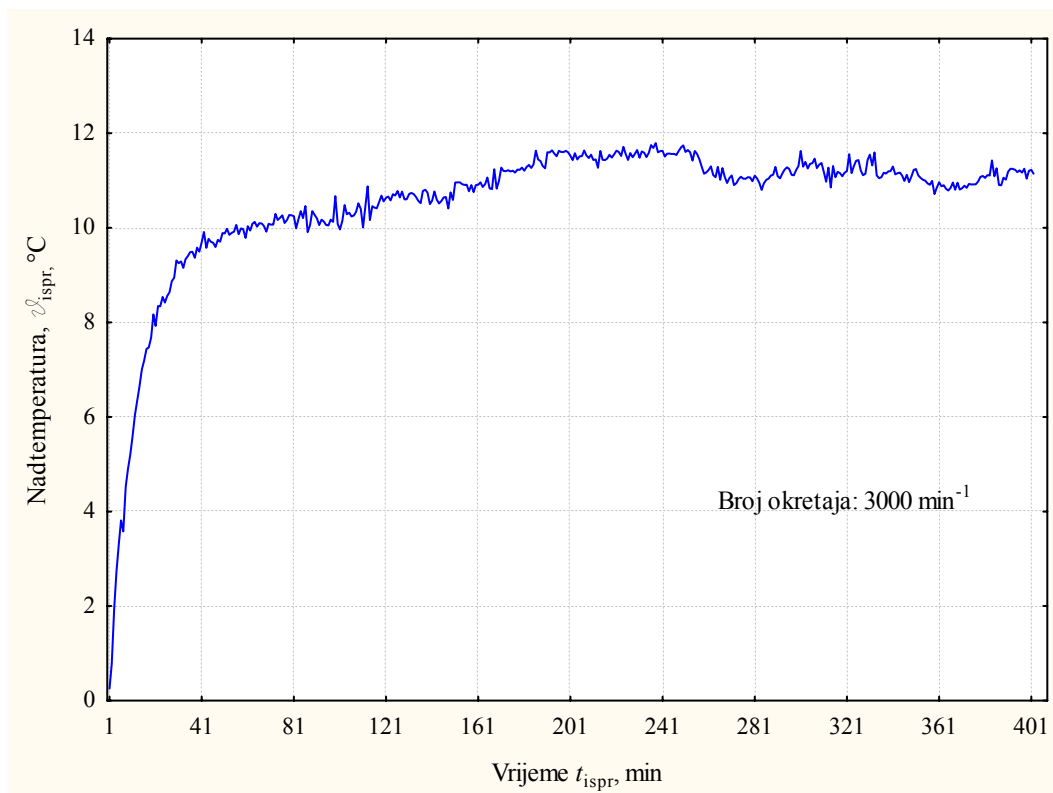
Slika 6.2 Temperaturna krivulja ispravnog kotrljajnog kugličnog ležaja na  $1000 \text{ min}^{-1}$



Slika 6.3 Temperaturna krivulja ispravnog kotrljajnog kugličnog ležaja na  $2000 \text{ min}^{-1}$

Iz temperaturne krivulje vidljivo je da kotrljajni kuglični ležaj bez oštećenja postiže stacionarnu temperaturu u razdoblju nakon približno 60 min. Nadtemperatura koja se postiže

u stacionarnom radu pri nazivnih  $3000 \text{ min}^{-1}$  je oko  $11 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .



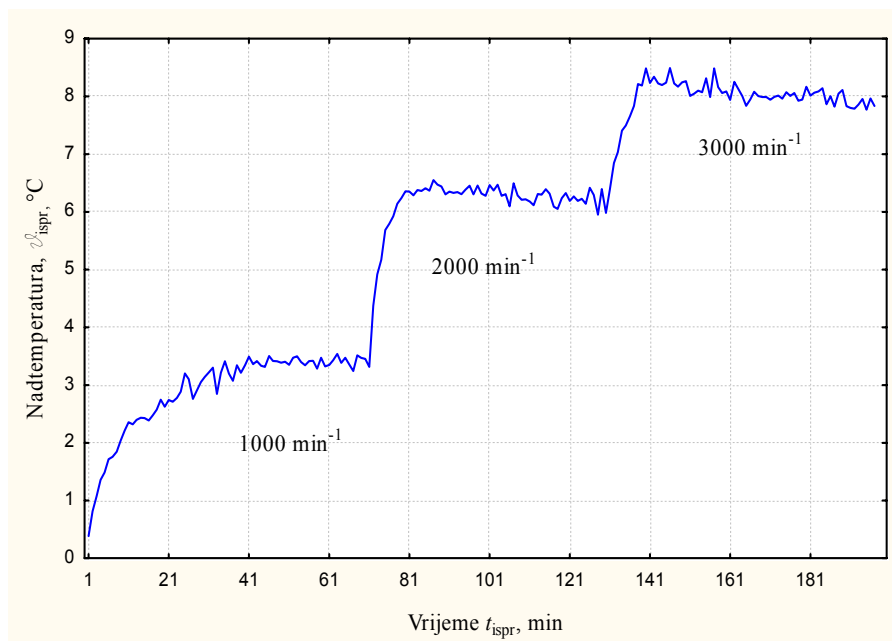
**Slika 6.4** Temperaturna krivulja ispravnog kotrljajnog kugličnog ležaja na  $3000 \text{ min}^{-1}$

Prilikom ispitivanja kotrljajnog kugličnog ležaja u stacionarnom radu temperatura se nije značajno mijenjala, tako da je ispitivanje završeno nakon 400 min.

### 6.3.2 Rezultati mjerenja temperature ispravnog kotrljajnog kugličnog ležaja SKF 6206 s promjenjivim brojem okretaja

U industrijskim postrojenjima s eksplozivnom atmosferom postoji i dio rotacijske opreme koja zbog tehnoloških razloga treba posjedovati promjenu broja okretaja. To se prvenstveno zahtijeva kako bi se zadovoljili određeni tehnološki parametri (npr. različiti protok medija, promjena broja okretaja ventilatora kod razrijeđene eksplozivne atmosfere u zatvorenim prostorima i sl.). Pomoću frekvencijskih pretvarača prvenstveno se postiže promjena broja okretaja kod elektromotora. Provedeno je ispitivanje kako bi se razmotrio utjecaj promjene broja okretaja na mogućnost povišenja temperature u ispravnom kotrljajnom kugličnom ležaju. Ispitivanje se provodilo frekvencijskim pretvaračem „Končar” tip: konventor.





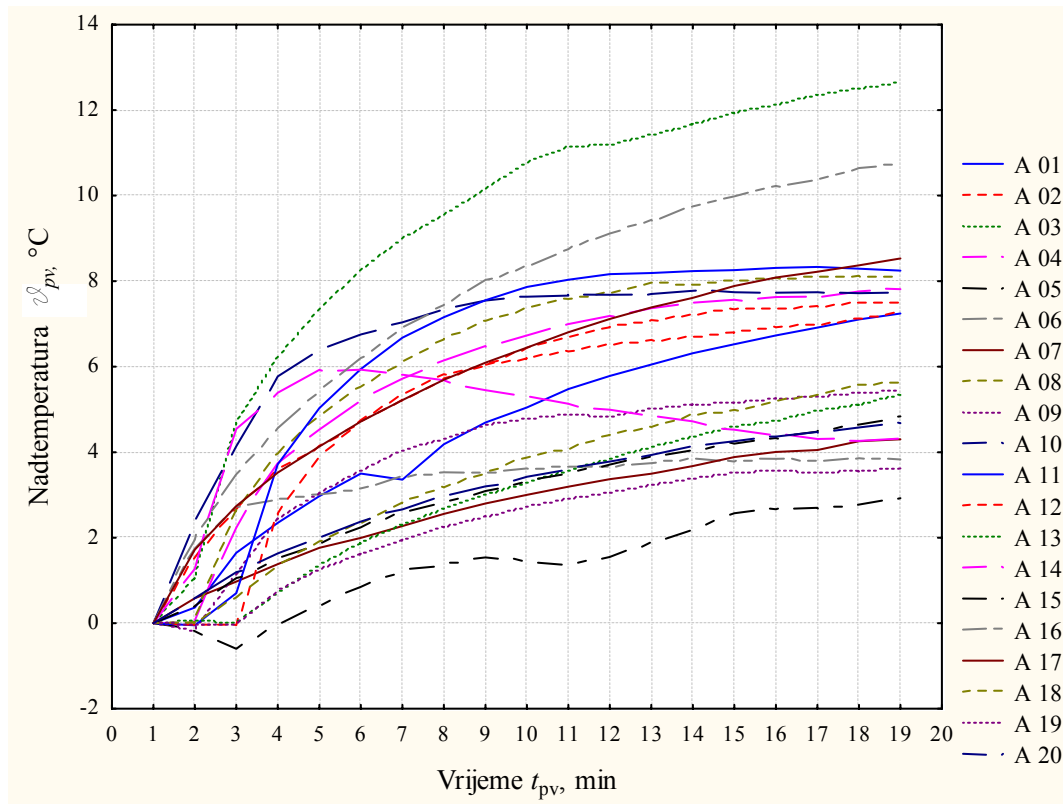
**Slika 6.5** Temperaturna krivulja kotrljajnog kugličnog ležaja SKF 6206 bez oštećenja u ovisnosti o broju okretaja

Prilikom pokretanja ispitnog sustava, elektromotor se pogoni preko frekvencijskog pretvarača s  $1000 \text{ min}^{-1}$ . U početnom razdoblju s  $1000 \text{ min}^{-1}$  vidljivo je da se nadtemperatura u kotrljajnom kugličnom ležaju ustalila na vrijednosti od približno  $3,5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Nakon vremena ustaljivanja rada kotrljajnog kugličnog ležaja, broj okretaja (71 min) povećan je s  $1000 \text{ min}^{-1}$  na  $2000 \text{ min}^{-1}$ . Vidljiv je porast temperature od  $3,5 \text{ }^\circ\text{C}$  do  $6,3 \text{ }^\circ\text{C}$  u razmjerno kratkom vremenu od 71 min do 80 min. Nakon ustaljivanja rada kotrljajnog kugličnog ležaja, broj okretaja je povećan (131 min) sa  $2000 \text{ min}^{-1}$  na  $3000 \text{ min}^{-1}$ , odnosno na nazivni broj okretaja pogonskog elektromotora. Vidljiv je porast temperature od  $6,3 \text{ }^\circ\text{C}$  do  $8 \text{ }^\circ\text{C}$  u razmjerno kratkom vremenu od 131 min do 200 min. Nakon razdoblja rada (od 131 min do 200 min) te vidljivog ustaljivanja temperature, ispitivanje je završeno.

#### 6.4 Rezultati mjerenja temperature u razdoblju početka rada $\mathcal{G}_p$ kotrljajnog kugličnog ležaja SKF 6206 s oštećenjem

Razdoblje početka rada ležaja SKF određeno je kao razdoblje vremena od trenutka početka ispitivanja do točke na temperaturnoj krivulji kad se temperatura ustalila na promjenu manju od  $3 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### 6.4.1 Rezultati mjerenja temperature u razdoblju početka rada $\mathcal{G}_{pv}$ kotrljajnih kugličnih ležajeva s oštećenjem vanjskog prstena



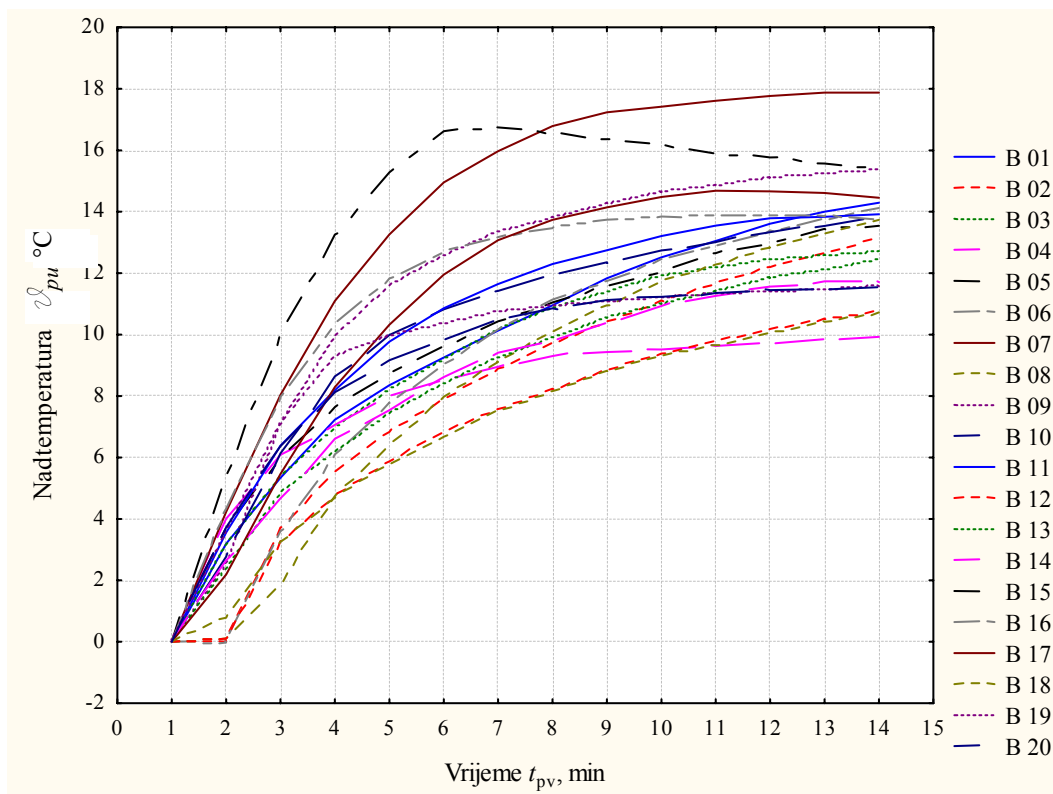
**Slika 6.6** Prikaz temperaturnih krivulja u razdoblju početka rada kotrljajnih kugličnih ležajeva s oštećenjem vanjskog prstena

Rezultati mjerenja temperature u razdoblju početka rada  $\mathcal{G}_{pu}$  kotrljajnih kugličnih ležajeva s oštećenjem vanjskog prstena od trenutka početka rada do trenutka ustaljivanja temperature, odnosno početka stacionarnog rada, prikazani su na slici 6.6.

Iz temperaturnih krivulja kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem vanjskog prstena (skupina A) vidljivo je da se stacionarni uvjeti (ustaljivanje na promjenu temperature manju od 3 °C) postižu nakon 19 min.

### 6.4.2 Rezultati mjerenja temperature u razdoblju početka rada $\mathcal{G}_{pu}$ kotrljajnih kugličnih ležajeva s oštećenjem unutarnjeg prstena

Rezultati mjerenja temperature u razdoblju početka rada  $\mathcal{G}_{pu}$  kotrljajnih kugličnih ležajeva s oštećenjem unutarnjeg prstena od trenutka početka rada do trenutka ustaljivanja temperature, odnosno početka stacionarnog rada prikazani su na slici 6.7.

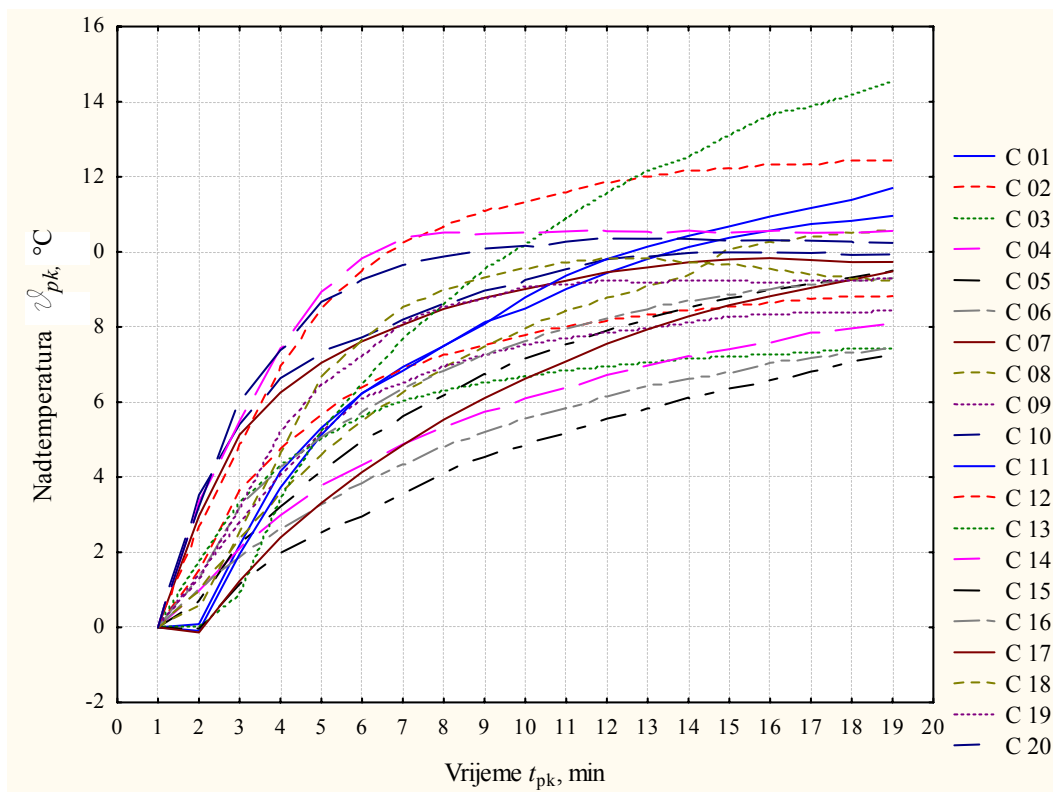


**Slika 6.7** Prikaz temperaturnih krivulja u razdoblju početka rada kotrljajnih ležajeva s oštećenjem unutarnjeg prstena

Iz temperaturnih krivulja kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem unutarnjeg prstena (skupina B) vidljivo je da se stacionarni uvjeti (ustaljivanje na promjenu temperature manju od 3 °C) postižu nakon 14 min.

### 6.4.3 Rezultati mjerenja temperature u razdoblju početka rada $\mathcal{G}_{pk}$ kotrljajnih kugličnih ležajeva s oštećenjem kaveza

Rezultati mjerenja temperature u razdoblju početka rada  $\mathcal{G}_{pk}$  kotrljajnih kugličnih ležajeva s oštećenjem kaveza od trenutka početka rada do trenutka ustaljivanja temperature, odnosno početka stacionarnog rada prikazani su na slici 6.8.



**Slika 6.8** Prikaz temperaturnih krivulja u razdoblju početka rada kotrljajnih kugličnih ležajeva s oštećenjem kaveza

Iz temperaturnih krivulja kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem unutarnjeg prstena (skupina B) vidljivo je da se stacionarni uvjeti (ustaljivanje na promjenu temperature manju od 3 °C) postižu nakon 19 min.

#### **6.4.4. Usporedba dostizanja stacionarne temperature u razdoblju početka rada ispravnog kotrljajnog kugličnog ležaja i kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem**

Kod ispitivanja temperature u razdoblju početka rada vidljivo je da je kod kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem unutarnjeg prstena dostizanje stacionarne temperature najbrže, tj. u razdoblju od 14 min. Kod kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem kaveza i s oštećenjem vanjskog prstena postizanje stacionarne temperature u razdoblju početka rada je približno istovjetno te iznosi 19 min.

Uspoređujući dobivene temperaturne krivulje između ispravnog kotrljajnog kugličnog ležaja i onog s jednim od tri različite lokacije oštećenja, moguće je uvidjeti da je postizanje stacionarnog stanja (temperature) mnogo brže kod kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem. Zapravo, kod ispravnog kotrljajnog kugličnog ležaja vrijeme postizanja stacionarnog stanja (temperature) iznosi 60 min, a kod ležaja s oštećenjem značajno manje, tj. od 14 min do 19 min.

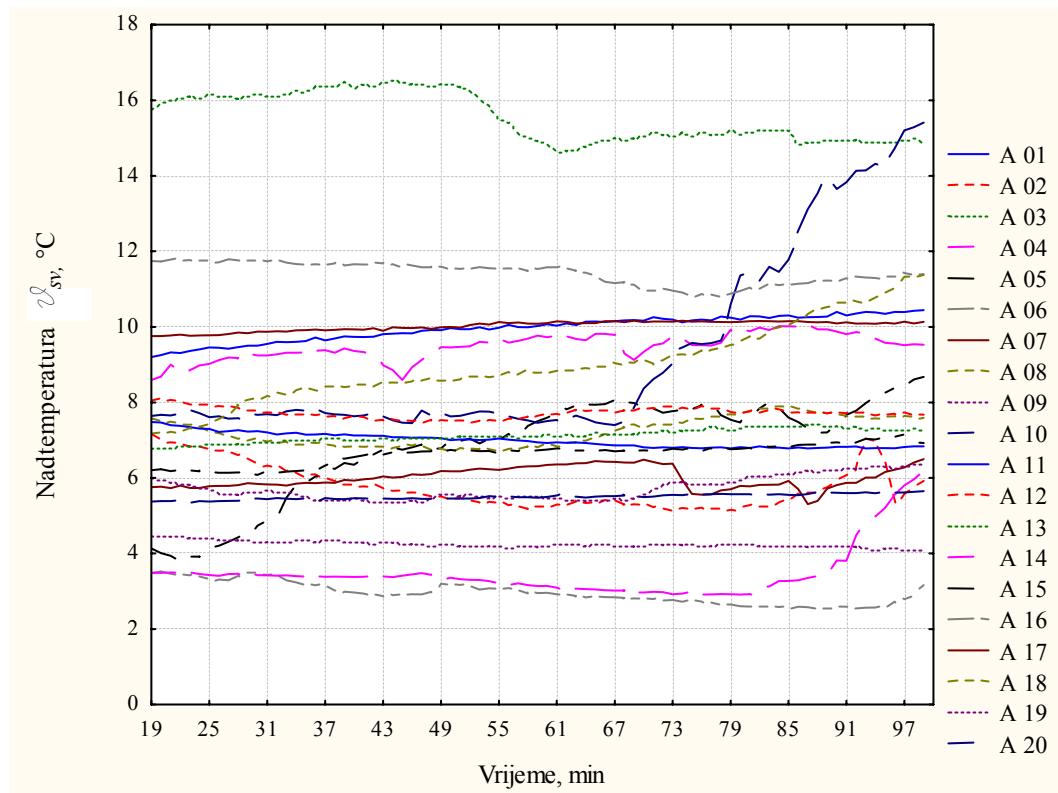
#### **6.5 Rezultati mjerenja temperature u stacionarnom radu $\mathcal{G}_s$ kotrljajnog kugličnog ležaja SKF 6206 s oštećenjem**

Stacionarni rad kotrljajnog kugličnog ležaja određen je kao razdoblje vremena od točke na temperaturnoj krivulji koja označava završetak razdoblja početka rada (odnosno ustaljivanja rada) do točke kad se pojavilo odstupanje promjene temperature veće od 3 °C.

##### **6.5.1 Rezultati mjerenja temperature u stacionarnom radu $\mathcal{G}_{sv}$ kotrljajnih kugličnih ležajeva s oštećenjem vanjskog prstena**

Rezultati mjerenja temperature u stacionarnom radu  $\mathcal{G}_{sv}$  kotrljajnih kugličnih ležajeva SKF 6206 s oštećenjem vanjskog prstena sve do trenutka otkaza prikazani su na slici 6.9.

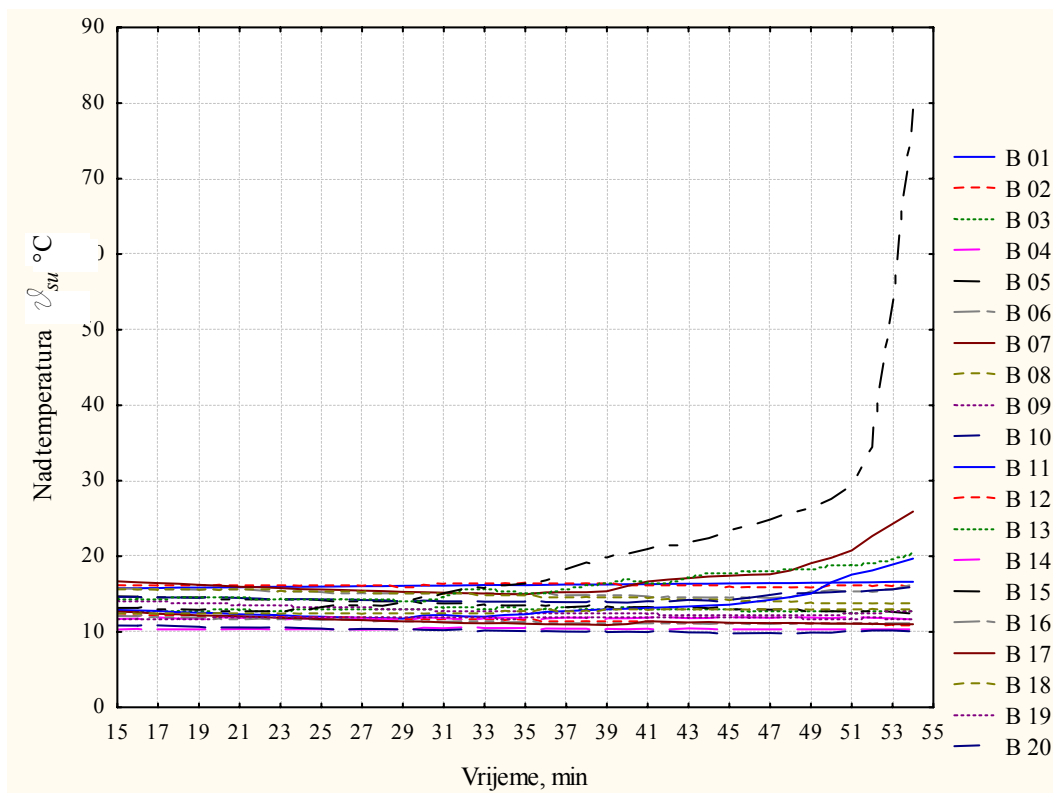
Iz temperaturnih krivulja (slika 6.9) moguće je uočiti da su nadtemperature kotrljajnih kugličnih ležajeva s oštećenjem vanjskog prstena (skupina A) u stacionarnim uvjetima rada  $\mathcal{G}_{sv}$  distribuirane u rasponu nadtemperature od 3 °C do 16 °C.



**Slika 6.9** Prikaz temperaturnih krivulja u razdoblju stacionarnog rada kotrljajnih kugličnih ležajeva s oštećenjem vanjskog prstena

### 6.5.2 Rezultati mjerenja temperature u stacionarnom radu $\mathcal{G}_{su}$ kotrljajnih kugličnih ležajeva s oštećenjem unutarnjeg prstena

Rezultati mjerenja temperature u stacionarnom radu  $\mathcal{G}_{su}$  kotrljajnih kugličnih ležajeva SKF 6206 s oštećenjem unutarnjeg prstena sve do trenutka otkaza prikazani su na slici 6.10.



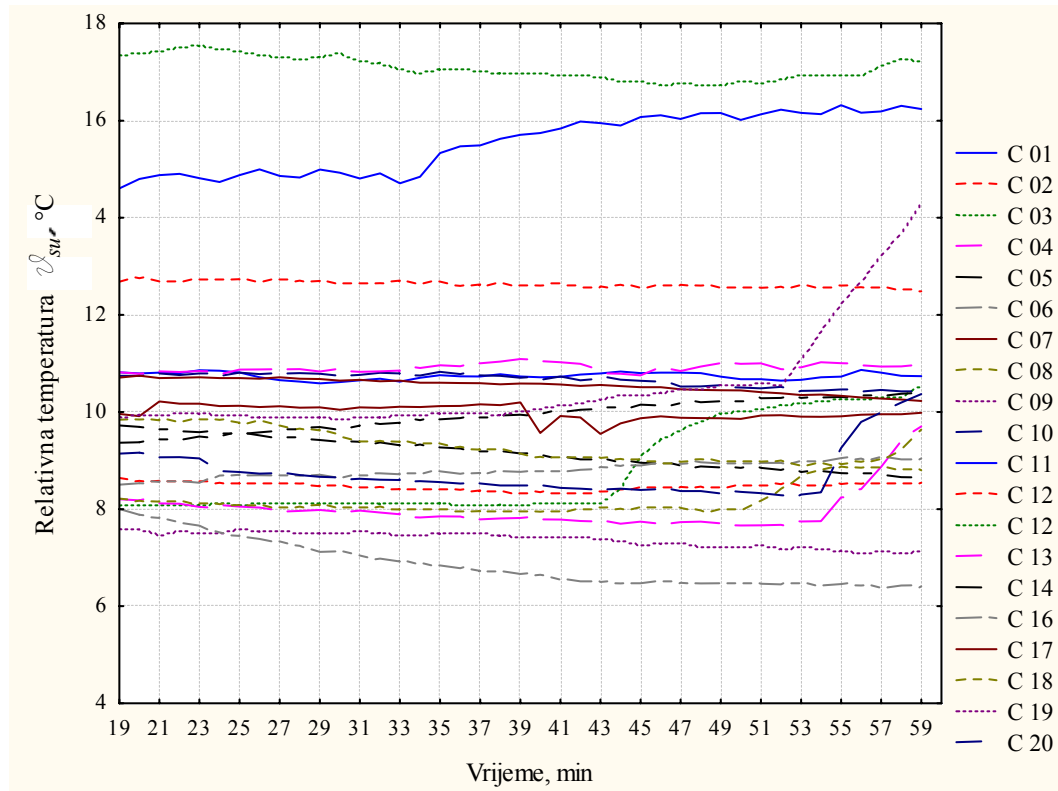
**Slika 6.10** Prikaz temperaturnih krivulja u razdoblju stacionarnog rada kotrljajnih kugličnih ležajeva s oštećenjem unutarnjeg prstena

Iz dobivenih temperaturnih krivulja moguće je uočiti da su nadtemperature kotrljajnih kugličnih ležajeva s oštećenjem unutarnjeg prstena (skupina B) u stacionarnim uvjetima rada  $\vartheta_{su}$  distribuirane u rasponu nadtemperature od 10 °C do 18 °C.

### 6.5.3 Rezultati mjerenja temperature u stacionarnom radu $\vartheta_{sk}$ kotrljajnih kugličnih ležajeva s oštećenjem kaveza

Rezultati mjerenja temperature u stacionarnom radu  $\vartheta_{sk}$  kotrljajnih kugličnih ležajeva SKF 6206 s oštećenjem kaveza sve do trenutka otkaza prikazani su na slici 6.11.

Iz temperaturnih krivulja (slika 6.11) moguće je uočiti da su nadtemperature kotrljajnih kugličnih ležajeva s oštećenjem kaveza (skupina C) u stacionarnim uvjetima rada  $\vartheta_{su}$  distribuirane u rasponu nadtemperature od 7 °C do 16 °C.



**Slika 6.11** Prikaz temperaturnih krivulja u razdoblju stacionarnog rada kotrljajnih kugličnih ležajeva s oštećenjem kaveza

#### 6.5.4 Usporedba temperatura u razdoblju stacionarnog rada ispravnog kotrljajnog kugličnog ležaja i kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem

Kod ispitivanja temperature u razdoblju stacionarnog rada vidljivo je da nema izrazito značajnih razlika između ispravnog i oštećenog kotrljajnog kugličnog ležaja.

Također nema vidljivih i jednoznačnih razlika između nadtemperatura kod kotrljajnog kugličnog ležaja s različitim oštećenjima u razdoblju stacionarnog rada.

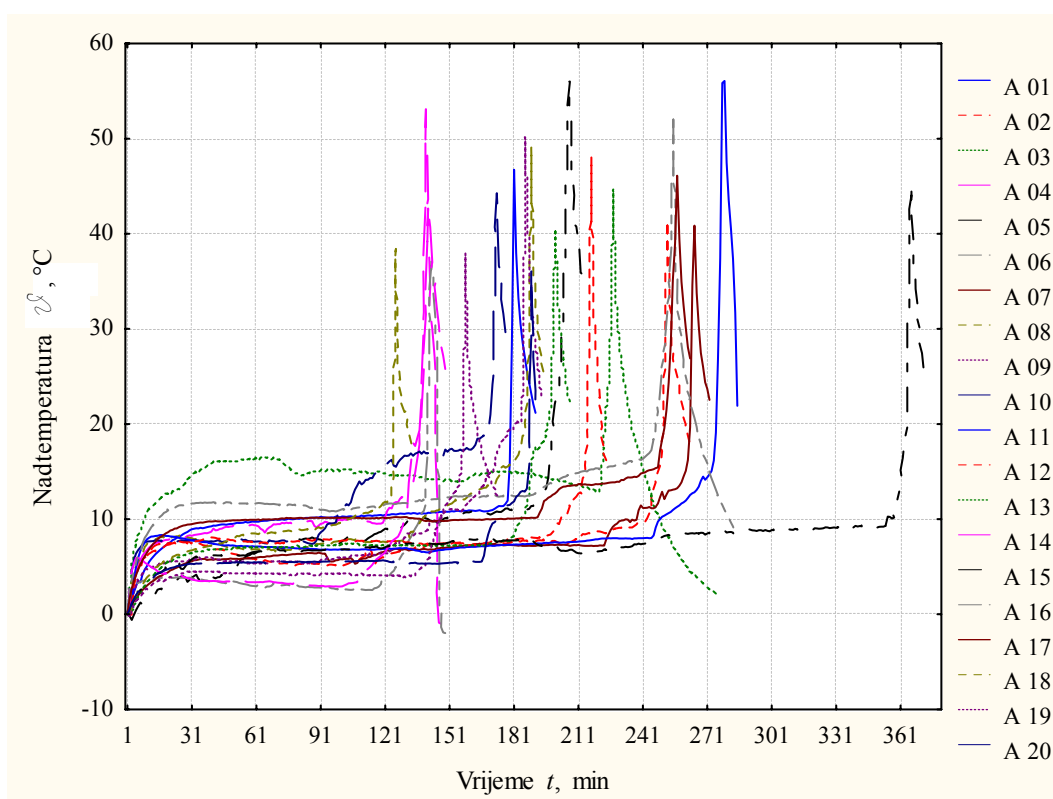


## 6.6 Rezultati mjerenja vremena i temperature u razdoblju otkazivanja kotrljajnog kugličnog ležaja SKF 6206 s oštećenjem

Razdoblje otkazivanja kotrljajnog kugličnog ležaja SKF određeno je kao razdoblje vremena od točke na temperaturnoj krivulji koja označava završetak razdoblja stacionarnog rada do točke na temperaturnoj krivulji kod koje je došlo do otkaza (zaribavanja) ležaja. Za analizu razdoblja otkazivanja (III. razdoblje na slici 6.1) prikazana je cijela temperaturna krivulja kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem, na kojoj je dobro uočljivo razdoblje otkazivanja.

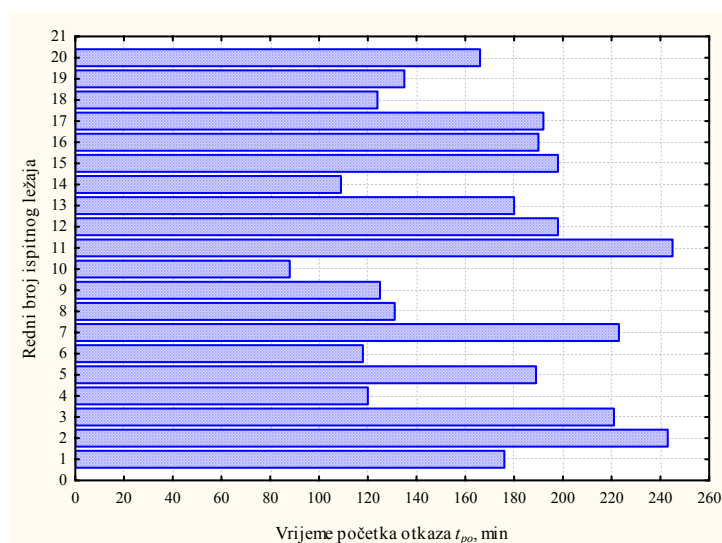
### 6.6.1 Rezultati mjerenja vremena početka otkaza $t_{po}$ , temperature početka otkaza $\vartheta_{po}$ , vremena otkaza (zaribavanja) $t_z$ i temperature zaribavanja $\vartheta_z$ kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem vanjskog prstena

Rezultati mjerenja temperature rada kotrljajnih kugličnih ležajeva SKF 6206 s oštećenjem vanjskog prstena do trenutka otkaza (zaribavanja) prikazani su na slici 6.12.



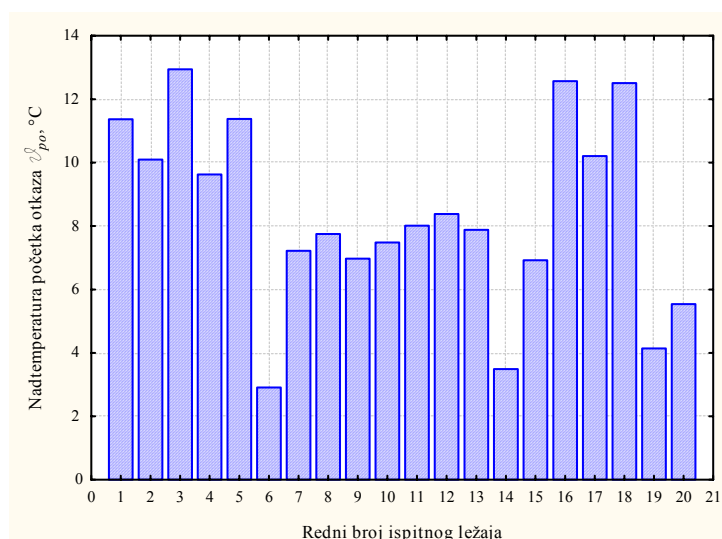
**Slika 6.12** Prikaz temperaturnih krivulja kotrljajnih kugličnih ležajeva s oštećenjem vanjskog prstena

U histogramu (slika 6.13) prikazana su za svaki pojedinačni kotrljajni kuglični ležaj s oštećenjem vanjskog prstena (skupina A) vremena početka otkaza  $t_{po}$ . Vidljivo je da se vremena otkaza (zaribavanja)  $t_{po}$  kreću od 88 min do 245 min.



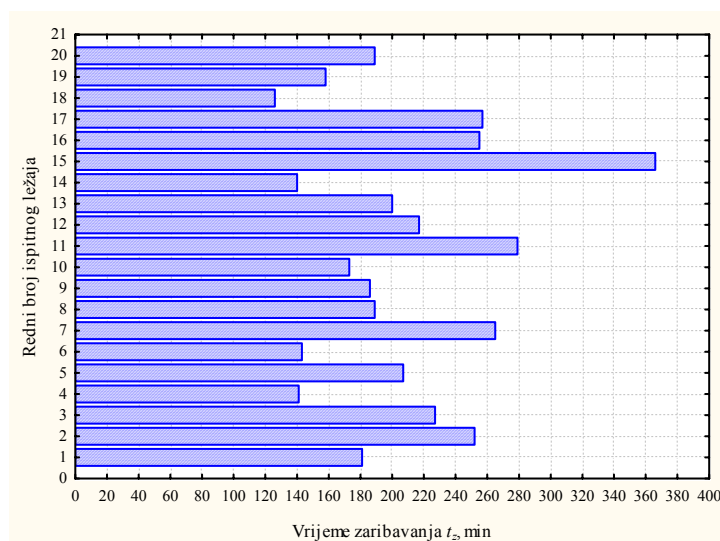
**Slika 6.13** Vrijeme početka otkaza  $t_{po}$  za kotrljajne kuglične ležajeve s oštećenjem vanjskog prstena

U histogramu (slika 6.14) prikazane su za svaki pojedinačni kotrljajni kuglični ležaj s oštećenjem vanjskog prstena (skupina A) temperature početka otkaza  $\vartheta_{po}$ . Vidljivo je da se nadtemperature početka otkaza  $\vartheta_{po}$  kreću od 3,49 °C do 12,94 °C.



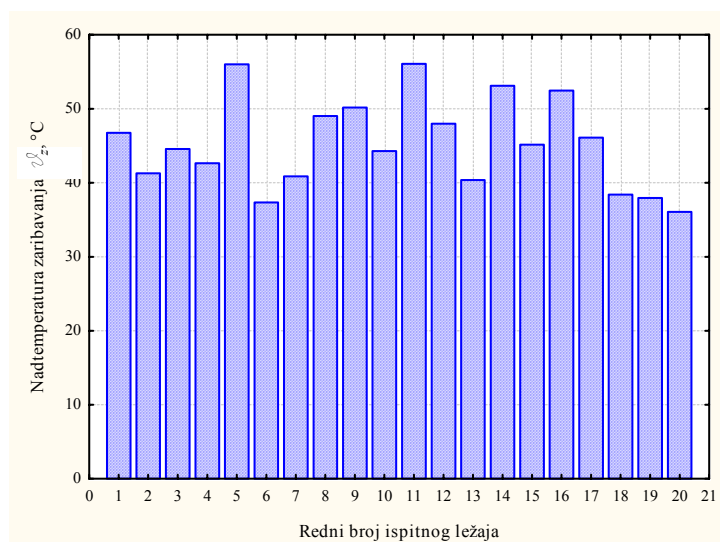
**Slika 6.14** Nadtemperatura početka otkaza  $\vartheta_{po}$  za kotrljajne kuglične ležajeve s oštećenjem vanjskog prstena

U histogramu (slika 6.15) prikazana su za svaki pojedinačni ležaj s oštećenjem vanjskog prstena (skupina A) vremena otkaza (zaribavanja)  $t_z$ . Vidljivo je da se vremena otkaza (zaribavanja)  $t_z$  kreću od 126 min do 366 min.



**Slika 6.15** Vrijeme otkaza (zaribavanja)  $t_z$  za kotrljajne kuglične ležajeve s oštećenjem vanjskog prstena

U histogramu (slika 6.16) prikazane su za svaki pojedinačni kotrljajni kuglični ležaj s oštećenjem vanjskog prstena (skupina A) temperature otkaza (zaribavanja)  $\vartheta_z$ . Vidljivo je da se nadtemperature otkaza (zaribavanja)  $\vartheta_z$  kreću od 36,05 °C do 56,07 °C.



**Slika 6.16** Nadtemperatura otkaza (zaribavanja)  $\vartheta_z$  za kotrljajne kuglične ležajeve s oštećenjem vanjskog prstena

### 6.6.1.1 Test normalnosti za vrijeme početka otkaza $t_{po}$

Proveden je test normalnosti za vremena početka otkaza  $t_{po}$  kotrljajnih kugličnih ležajeva s oštećenjem vanjskog prstena.

**Tablica 6.1** Normalna razdioba vremena početka otkaza  $t_{po}$  za kotrljajne kuglične ležajeve s oštećenjem vanjskog prstena

Gornja granica	Varijabela: Vrijeme početka otkaza, Razdioba: Normalna (UKUPNO_VANJSKI_PRSTEN.sta) Kolmogorov-Smirnov d = 0,16770				
	Stvarne frekvencije	Kumulativne (stvarne) frekvencije	Teorijske frekvencije	Kumulativne (teorijske) frekvencije	Razlika stvarnih i teorijskih frekvencija
$\leq 110,00000$	2	2	2,055522	2,05552	-0,05552
150,00000	6	8	4,758436	6,81396	1,24156
190,00000	5	13	6,621200	13,43516	-1,62120
230,00000	5	18	4,629189	18,06435	0,37081
$\geq 230,00000$	2	20	1,935653	20,00000	0,06435

### 6.6.1.2 Test normalnosti za temperaturu početka otkaza $\mathcal{G}_{po}$

Proveden je test normalnosti za temperature početka otkaza  $\mathcal{G}_{po}$  kotrljajnih kugličnih ležajeva s oštećenjem vanjskog prstena.

**Tablica 6.2** Normalna razdioba temperature početka otkaza  $\mathcal{G}_{po}$  za kotrljajne kuglične ležajeve s oštećenjem vanjskog prstena

Gornja granica	Varijabela: Temperatura početka otkaza, Razdioba: Normalna (UKUPNO_VANJSKI_PRSTEN.sta) Kolmogorov-Smirnov d = 0,11298				
	Stvarne frekvencije	Kumulativne (stvarne) frekvencije	Teorijske frekvencije	Kumulativne (teorijske) frekvencije	Razlika stvarnih i teorijskih frekvencija
$\leq 3,16667$	1	1	0,802768	0,80277	0,197232
5,33333	2	3	2,270890	3,07366	-0,270890
7,50000	5	8	4,625787	7,69945	0,374213
9,66667	5	13	5,671244	13,37069	-0,671244
11,83333	4	17	4,185830	17,55652	-0,185830
$\geq 11,83333$	3	20	2,443481	20,00000	0,556519

### 6.6.1.3 Test normalnosti za vrijeme otkaza (zaribavanja) $t_z$

Proveden je test normalnosti za vremena otkaza (zaribavanja)  $t_z$  za kotrljajne kuglične ležajeve s oštećenjem vanjskog prstena.

**Tablica 6.3** Normalna razdioba vremena otkaza (zaribavanja)  $t_z$  za kotrljajne kuglične ležajeve s oštećenjem vanjskog prstena

Gornja granica	Varijabla: Vrijeme otkaza (zaribavanja), Razdioba: Normalna (UKUPNO_VANJSKI_PRSTEN.sta) Kolmogorov-Smirnov d = 0,11298				
	Stvarne frekvencije	Kumulativne (stvarne) frekvencije	Teorijske frekvencije	Kumulativne (teorijske) frekvencije	Razlika stvarnih i teorijskih frekvencija
$\leq 150,00000$	4	4	3,289327	3,28933	0,71067
200,00000	7	11	5,691556	8,98088	1,30844
250,00000	3	14	6,304560	15,28544	-3,30456
300,00000	5	19	3,546449	18,83189	1,45355
350,00000	0	19	1,011398	19,84329	-1,01140
$\geq 350,00000$	1	20	0,156709	20,00000	0,84329

### 6.6.1.4 Test normalnosti za temperaturu otkaza (zaribavanja) $\mathcal{G}_z$

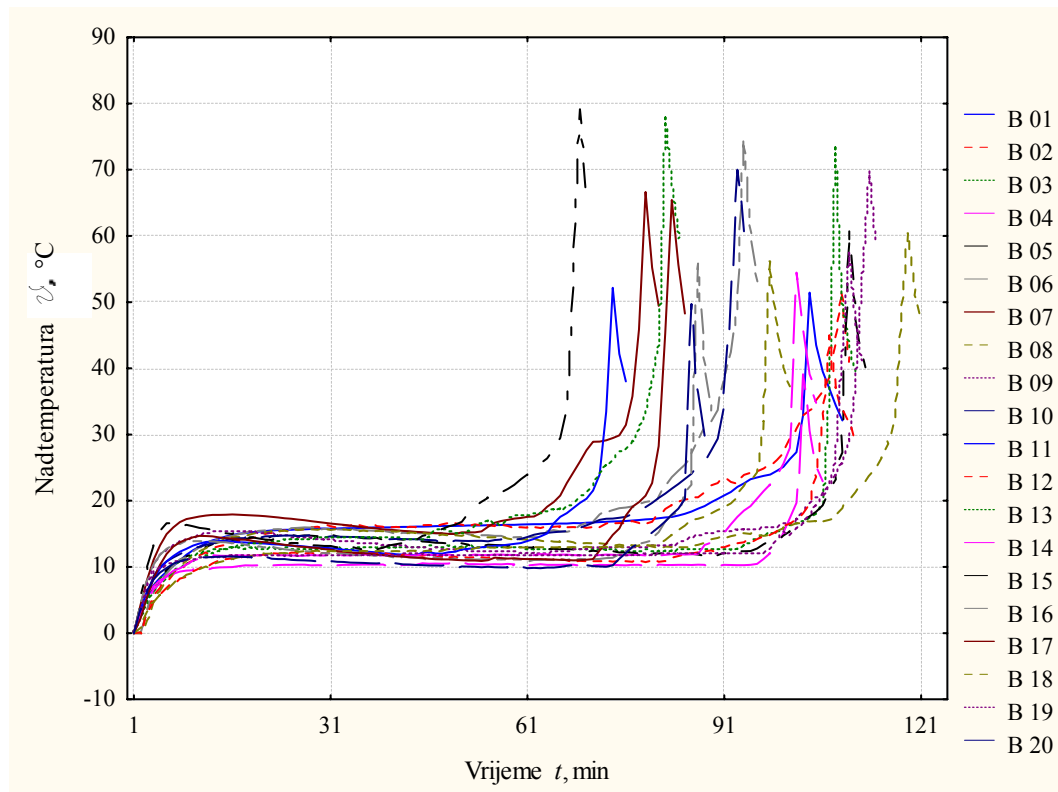
Proveden je test normalnosti za temperature otkaza (zaribavanja)  $\mathcal{G}_z$  za kotrljajne kuglične ležajeve s oštećenjem vanjskog prstena.

**Tablica 6.4** Normalna razdioba temperature otkaza (zaribavanja)  $\mathcal{G}_z$  za kotrljajne kuglične ležajeve s oštećenjem vanjskog prstena

Gornja granica	Varijabla: Temperatura otkaza (zaribavanja), Distribution: Normal (UKUPNO_proces) Kolmogorov-Smirnov d = 0,09656,				
	Stvarne frekvencije	Kumulativne (stvarne) frekvencije	Teorijske frekvencije	Kumulativne (teorijske) frekvencije	Razlika stvarnih i teorijskih frekvencija
$\leq 37,7142$	2	2	2,128025	2,12802	-0,12802
41,42857	5	7	3,106076	5,23410	1,89392
45,14286	3	10	4,524184	9,75828	-1,52418
48,85714	4	14	4,605694	14,36398	-0,60569
52,57143	3	17	3,277025	17,64100	-0,27702
56,28571	3	20	1,629422	19,27042	1,37058
$\geq 56,28571$	0	20	0,729575	20,00000	-0,72958

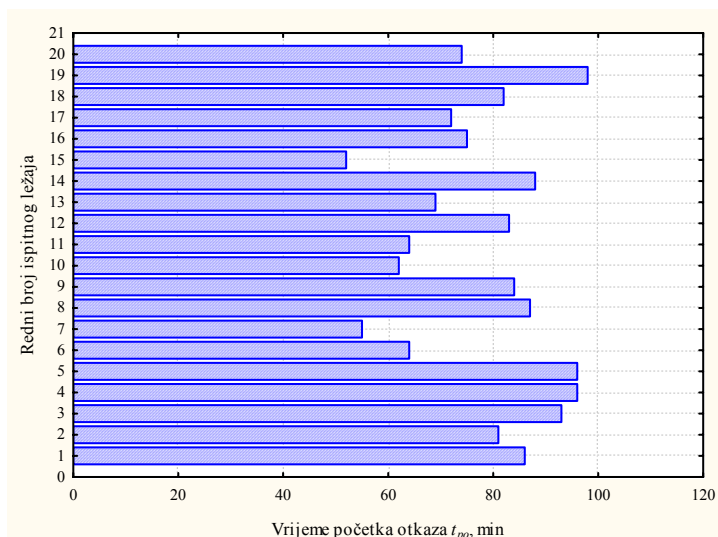
### 6.6.2 Rezultati mjerenja vremena početka otkaza $t_{po}$ , temperature početka otkaza $\vartheta_{po}$ , vremena otkaza $t_z$ i temperature otkaza $\vartheta_z$ kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem unutarnjeg prstena

Rezultati mjerenja temperature rada kotrljajnih kugličnih ležajeva SKF 6206 s oštećenjem unutarnjeg prstena sve do trenutka otkaza (zaribavanja) prikazani su na slici 6.17.



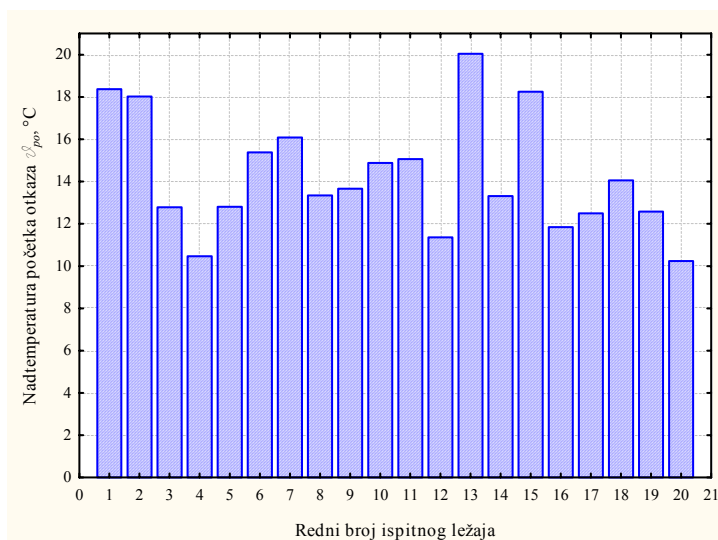
**Slika 6.17** Prikaz temperaturnih krivulja kotrljajnih ležajeva s oštećenjem unutarnjeg prstena

U histogramu (slika 6.18) prikazana su za svaki pojedinačni kotrljajni kuglični ležaj s oštećenjem unutarnjeg prstena (skupina B) vremena početka otkaza  $t_{po}$  (slika 6.18). Vidljivo je da se vremena početka otkaza  $t_{po}$  kreću od 52 min do 98 min.



**Slika 6.18** Vrijeme početka otkaza  $t_{po}$  za kotrljajne kuglične ležajeve s oštećenjem unutarnjeg prstena

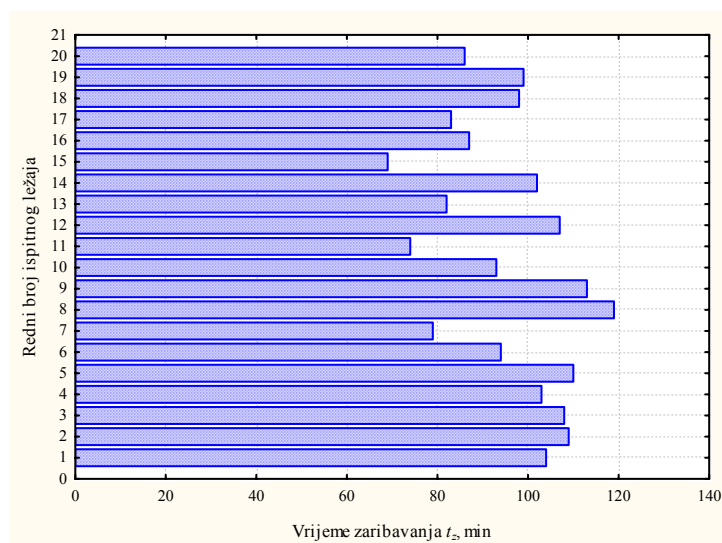
U histogramu (slika 6.19) prikazane su za svaki pojedinačni kotrljajni kuglični ležaj s oštećenjem unutarnjeg prstena (skupina B) temperature početka otkaza  $\mathcal{G}_{po}$ . Vidljivo je da se nadtemperature početka otkaza kreću od 10,24 °C do 20,04 °C.



**Slika 6.19** Nadtemperatura početka otkaza  $\mathcal{G}_{po}$  za kotrljajne kuglične ležajeve s oštećenje unutarnjeg prstena

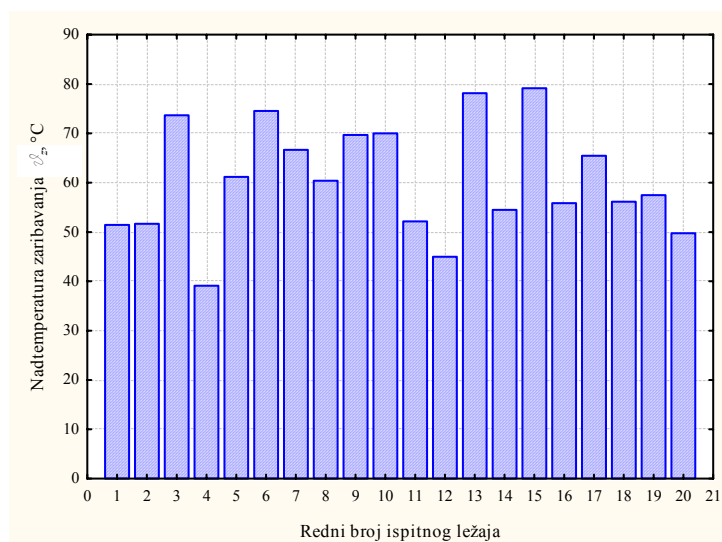
U histogramu (slika 6.20) prikazana su za svaki pojedinačni kotrljajni kuglični ležaj s

oštećenjem unutarnjeg prstena (skupina B) vremena otkaza (zaribavanja)  $t_z$ . Vidljivo je da se vremena početka otkaza kreću od 69 min do 119 min.



**Slika 6.20** Vrijeme otkaza (zaribavanja)  $t_z$  za kotrljajne kuglične ležajeve s oštećenjem unutarnjeg prstena

U histogramu (slika 6.21) prikazane su za svaki pojedinačni kotrljajni kuglični ležaj s oštećenjem unutarnjeg prstena (skupina B) temperature otkaza (zaribavanja)  $\vartheta_z$ . Vidljivo je da se nadtemperature početka otkaza kreću od 39,10 °C do 78,12 °C.



**Slika 6.21** Nadtemperatura otkaza (zaribavanja)  $\vartheta_z$  za kotrljajne kuglične ležajeve s oštećenjem unutarnjeg prstena



### 6.6.2.1 Test normalnosti za vrijeme početka otkaza $t_{po}$

Proveden je test normalnosti za vremena početka otkaza  $t_{po}$  za kotrljajne kuglične ležajeve s oštećenjem unutarnjeg prstena.

**Tablica 6.5** Normalna razdioba vremena početka otkaza  $t_{po}$  za kotrljajne kuglične ležajeve s oštećenjem unutarnjeg prstena

Gornja granica	Varijabla: Vrijeme početka otkaza, Razdioba: Normalna (Ukupno_unutarnji_prsten.sta) Kolmogorov-Smirnov d = 0,13486				
	Stvarne frekvencije	Kumulativne (stvarne) frekvencije	Teorijske frekvencije	Kumulativne (teorijske) frekvencije	Razlika stvarnih i teorijskih frekvencija
$\leq 57,00000$	2	2	1,261479	1,26148	0,73852
<b>69,00000</b>	4	6	3,846709	5,10819	0,15329
<b>81,00000</b>	4	10	6,589022	11,69721	-2,58902
<b>93,00000</b>	7	17	5,529109	17,22632	1,47089
$\geq 93,00000$	3	20	2,773681	20,00000	0,22632

### 6.6.2.2 Test normalnosti za temperaturu početka otkaza $\mathcal{G}_{po}$

Proveden je test normalnosti za temperature početka otkaza  $\mathcal{G}_{po}$  kotrljajnih kugličnih ležajeva s oštećenjem unutarnjeg prstena.

**Tablica 6.6** Normalna razdioba temperature početka otkaza  $\mathcal{G}_{po}$  za kotrljajne kuglične ležajeve s oštećenjem unutarnjeg prstena

Gornja granica	Varijabla: Temperatura početka otkaza, Razdioba: Normalna (Ukupno_unutarnji_prsten.sta) Kolmogorov-Smirnov d = 0,13508				
	Stvarne frekvencije	Kumulativne (stvarne) frekvencije	Teorijske frekvencije	Kumulativne (teorijske) frekvencije	Razlika stvarnih i teorijskih frekvencija
$\leq 11,60000$	3	3	3,344225	3,34422	-0,34422
<b>14,20000</b>	9	12	6,510471	9,85470	2,48953
<b>16,80000</b>	4	16	6,615480	16,47018	-2,61548
<b>19,40000</b>	3	19	2,923068	19,39324	0,07693
$\geq 19,40000$	1	20	0,606756	20,00000	0,39324

### 6.6.2.3 Test normalnosti za vrijeme otkaza (zaribavanja) $t_z$

Proveden je test normalnosti za vremena otkaza (zaribavanja)  $t_z$  kotrljajnih kugličnih ležajeva s oštećenjem unutarnjeg prstena.

**Tablica 6.7** Normalna razdioba vremena otkaza (zaribavanja)  $t_z$  za kotrljajne kuglične ležajeve s oštećenjem unutarnjeg prstena

Gornja granica	Variabla: Vrijeme otkaza (zaribavanja), Razdioba: Normalna (Ukupno_unutarnji_prsten.sta) Kolmogorov-Smirnov d = 0,11831				
	Stvarne frekvencije	Kumulativne (stvarne) frekvencije	Teorijske frekvencije	Kumulativne (teorijske) frekvencije	Razlika stvarnih i teorijskih frekvencija
$\leq 73,0000$	1	1	0,987206	0,98721	0,01279
<b>86,0000</b>	5	6	3,753750	4,74096	1,24625
<b>99,0000</b>	5	11	6,995860	11,73682	-1,99586
<b>112,0000</b>	7	18	5,780980	17,51780	1,21902
$\geq 112,0000$	2	20	2,482204	20,00000	-0,48220

### 6.6.2.4 Test normalnosti za temperaturu otkaza (zaribavanja) $\vartheta_z$

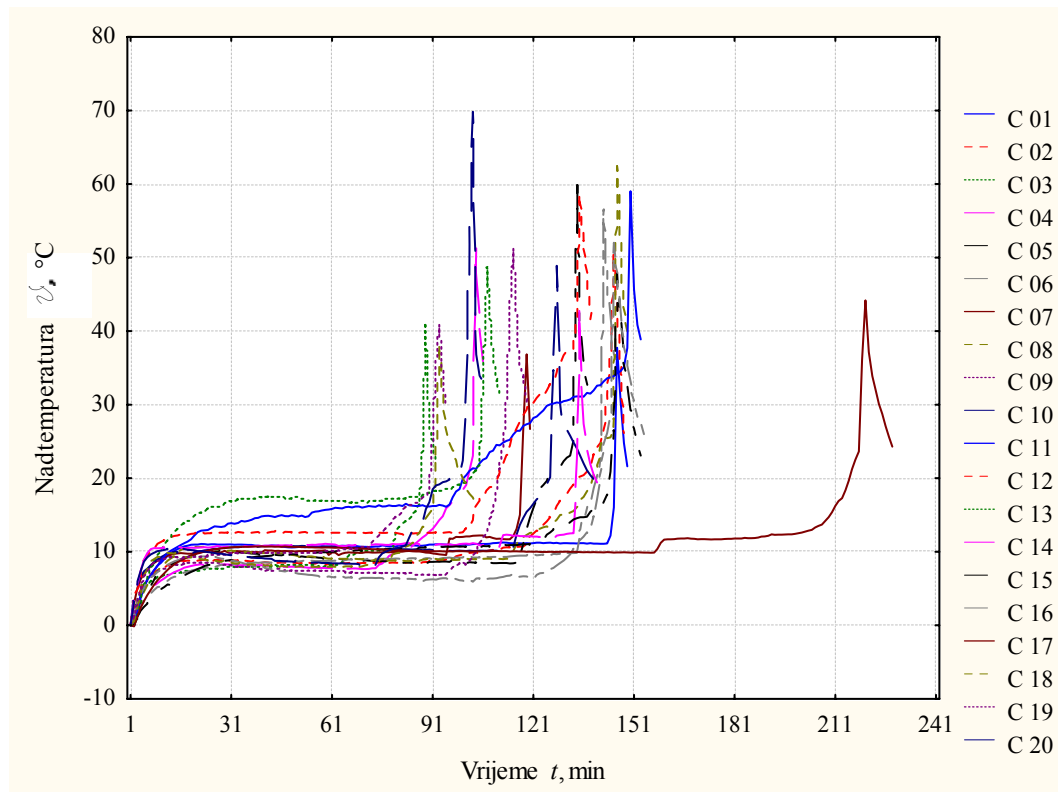
Proveden je test normalnosti za temperature otkaza (zaribavanja)  $\vartheta_z$  kotrljajnih kugličnih ležajeva s oštećenjem unutarnjeg prstena.

**Tablica 6.8** Normalna razdioba temperature otkaza (zaribavanja)  $\vartheta_z$  za kotrljajne kuglične ležajeve s oštećenjem unutarnjeg prstena

Gornja granica	Variabla: Temperatura zaribavanja, Razdioba: Normalna(Ukupno_unutarnji_prsten.sta) Kolmogorov-Smirnov d = 0,10895				
	Stvarne frekvencije	Kumulativne (stvarne) frekvencije	Teorijske frekvencije	Kumulativne (teorijske) frekvencije	Razlika stvarnih i teorijskih frekvencija
$\leq 45,00000$	2	2	1,650217	1,65022	0,34978
<b>55,00000</b>	5	7	4,534385	6,18460	0,46561
<b>65,00000</b>	5	12	6,867116	13,05172	-1,86712
<b>75,00000</b>	6	18	4,952157	18,00388	1,04784
$\geq 75,00000$	2	20	1,996125	20,00000	0,00388

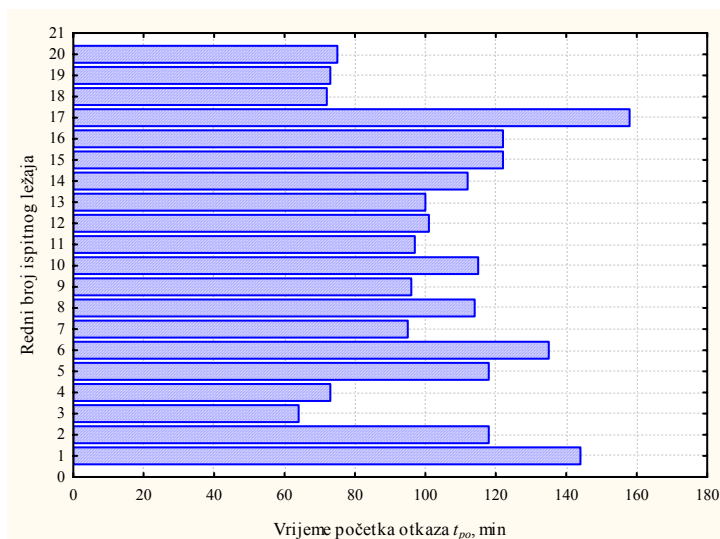
### 6.6.3 Rezultati mjerenja vremena početka otkaza $t_{po}$ , temperature početka otkaza $\vartheta_{po}$ , vremena otkaza (zaribavanja) $t_z$ i temperature zaribavanja $\vartheta_z$ kotrljajnih kugličnih ležajeva s oštećenjem kaveza

Rezultati mjerenja temperature rada kotrljajnih kugličnih ležajeva SKF 6206 s oštećenjem kaveza do trenutka otkaza (zaribavanja) prikazani su na slici 6.22.



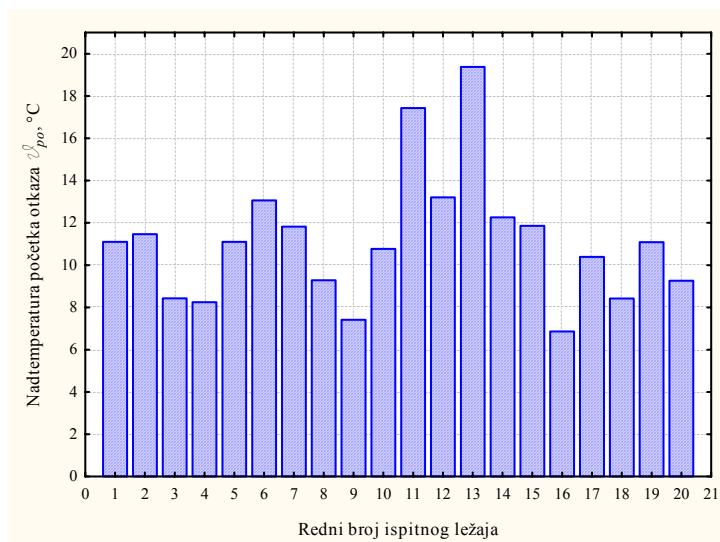
**Slika 6.22** Prikaz temperaturnih krivulja kotrljajnih kugličnih ležajeva s oštećenjem kaveza

U histogramu (slika 6.23) prikazana su za svaki pojedinačni kotrljajni kuglični ležaj s oštećenjem kaveza (skupina C) vremena početka otkaza  $t_{po}$ . Vidljivo je da se vremena početka otkaza  $t_{po}$  kreću od 64 min do 158 min.



**Slika 6.23** Vrijeme početka otkaza  $t_{po}$  za kotrljajne kuglične ležajeve s oštećenjem kaveza

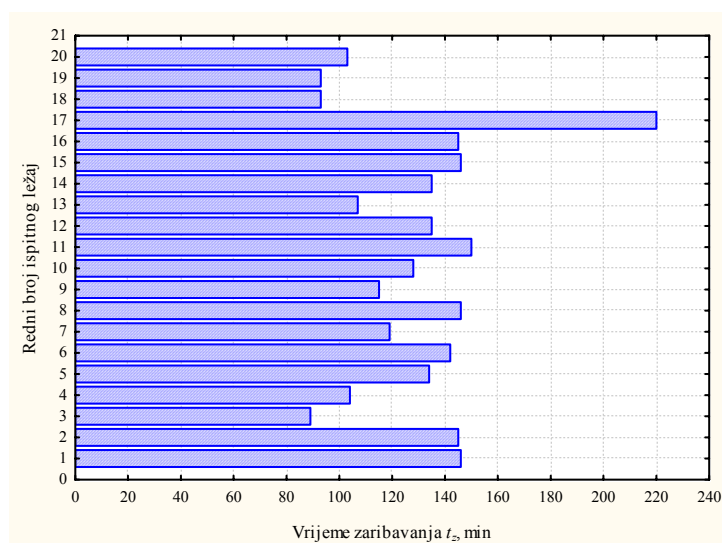
U histogramu (slika 6.24) prikazane su za svaki pojedinačni kotrljajni kuglični ležaj s oštećenjem kaveza (skupina C) temperature početka otkaza  $\mathcal{G}_{po}$ . Vidljivo je da se nadtemperature početka otkaza  $\mathcal{G}_{po}$  kreću od 6,86 °C do 19,38 °C.



**Slika 6.24** Nadtemperatura početka otkaza  $\mathcal{G}_{po}$  za kotrljajne kuglične ležajeve s oštećenjem kaveza

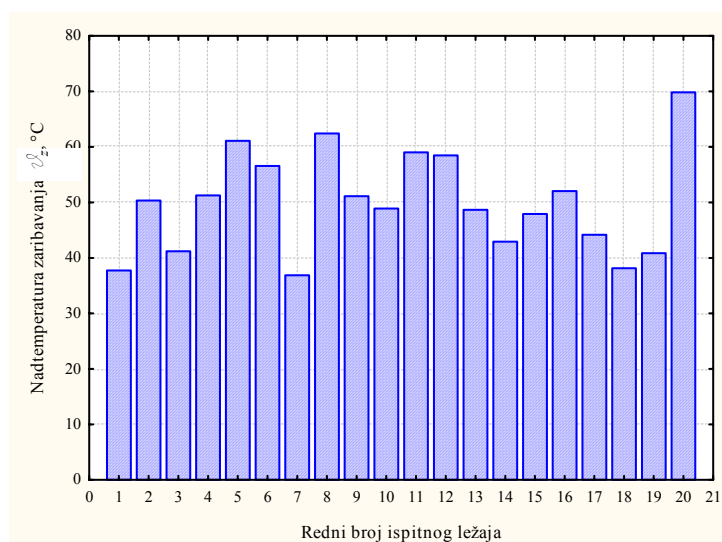
U histogramu (slika 6.25) prikazana su za svaki pojedinačni kotrljajni kuglični ležaj s oštećenjem kaveza (skupina C) vremena otkaza (zaribavanja)  $t_z$ . Vidljivo je da se vremena

otkaza (zaribavanja)  $t_z$  kreću od 89 min do 220 min.



**Slika 6.25** Vrijeme otkaza (zaribavanja)  $t_z$  za kotrljajne kuglične ležajeve s oštećenjem kaveza

U histogramu (slika 6.26) prikazane su za svaki pojedinačni kotrljajni kuglični ležaj s oštećenjem kaveza (skupina C) temperature otkaza (zaribavanja)  $\vartheta_z$ . Vidljivo je da se nadtemperature otkaza (zaribavanja)  $\vartheta_z$  kreću od 36,86 °C do 69,82 °C.



**Slika 6.26** Nadtemperatura otkaza (zaribavanja)  $\vartheta_z$  za kotrljajne kuglične ležajeve s oštećenjem kaveza

### 6.6.3.1 Test normalnosti za vrijeme početka otkaza $t_{po}$

Proveden je test normalnosti za vremena početka otkaza  $t_{po}$  kotrljajnih kugličnih ležajeva s oštećenjem kaveza.

**Tablica 6.9** Normalna razdioba vremena početka otkaza  $t_{po}$  za kotrljajne kuglične ležajeve s oštećenjem kaveza

Gornja granica	Variabla: Vrijeme početka otkaza, Razdioba: Normalna (Ukupno_KAVEZ.sta) Kolmogorov-Smirnov d = 0,13496				
	Stvarne frekvencije	Kumulativne (stvarne) frekvencije	Teorijske frekvencije	Kumulativne (teorijske) frekvencije	Razlika stvarnih i teorijskih frekvencija
$\leq 70,00000$	1	1	1,620467	1,62047	-0,62047
<b>90,00000</b>	4	5	3,824496	5,44496	0,17550
<b>110,00000</b>	5	10	6,031887	11,47685	-1,03189
<b>130,00000</b>	7	17	5,244181	16,72103	1,75582
<b>150,00000</b>	2	19	2,512617	19,23365	-0,51262
$\geq 150,00000$	1	20	0,766352	20,00000	0,23365

### 6.6.3.2 Test normalnosti za temperaturu početka otkaza $\mathcal{G}_{po}$

Proveden je test normalnosti za temperature početka otkaza  $\mathcal{G}_{po}$  kotrljajnih kugličnih ležajeva s oštećenjem kaveza.

**Tablica 6.10** Normalna razdioba temperature početka otkaza  $\mathcal{G}_{po}$  za kotrljajne kuglične ležajeve s oštećenjem kaveza

Gornja granica	Variabla: Temperatura početka otkaza, Razdioba: Normalna (Ukupno_KAVEZ.sta) Kolmogorov-Smirnov d = 0,15852				
	Stvarne frekvencije	Kumulativne (stvarne) frekvencije	Teorijske frekvencije	Kumulativne (teorijske) frekvencije	Razlika stvarnih i teorijskih frekvencija
$\leq 7,66667$	2	2	2,599010	2,59901	-0,59901
<b>10,33333</b>	5	7	5,333036	7,93205	-0,33304
<b>13,00000</b>	9	16	6,598356	14,53040	2,40164
<b>15,66667</b>	2	18	4,045282	18,57568	-2,04528
<b>18,33333</b>	1	19	1,226925	19,80261	-0,22693
$\geq 18,33333$	1	20	0,197392	20,00000	0,80261

### 6.6.3.3 Test normalnosti za vrijeme otkaza (zaribavanja) $t_z$

Proveden je test normalnosti za vremena otkaza (zaribavanja)  $t_z$  ležajeva s oštećenjem kaveza.

**Tablica 6.11** Normalna razdioba vremena otkaza (zaribavanja)  $t_z$  za kotrljajne kuglične ležajeve s oštećenjem kaveza

Gornja granica	Variabla: Vrijeme otkaza (zaribavanja), Razdioba: Normalna (Ukupno_KAVEZ.sta) Kolmogorov-Smirnov d = 0,19684				
	Stvarne frekvencije	Kumulativne (stvarne) frekvencije	Teorijske frekvencije	Kumulativne (teorijske) frekvencije	Razlika stvarnih i teorijskih frekvencija
$\leq 95,00000$	3	3	2,401561	2,40156	0,59844
120,00000	5	8	5,015740	7,41730	-0,01574
145,00000	7	15	6,520456	13,93776	0,47954
170,00000	4	19	4,325538	18,26330	-0,32554
195,00000	0	19	1,462541	19,72584	-1,46254
$\geq 195,00000$	1	20	0,274164	20,00000	0,72584

### 6.6.3.4 Test normalnosti za temperaturu otkaza (zaribavanja) $\vartheta_z$

Proveden je test normalnosti za temperature otkaza (zaribavanja)  $\vartheta_z$  kotrljajnih kugličnih ležajeva s oštećenjem kaveza.

**Tablica 6.12** Normalna razdioba temperature otkaza (zaribavanja)  $\vartheta_z$  za kotrljajne kuglične ležajeve s oštećenjem kaveza

Gornja granica	Variabla: Temperatura otkaza (zaribavanja), Razdioba: Normalna (Ukupno_KAVEZ.sta) Kolmogorov-Smirnov d = 0,11163				
	Stvarne frekvencije	Kumulativne (stvarne) frekvencije	Teorijske frekvencije	Kumulativne (teorijske) frekvencije	Razlika stvarnih i teorijskih frekvencija
$\leq 40,40000$	3	3	2,953208	2,95321	0,046792
48,80000	6	9	6,022814	8,97602	-0,022814
57,20000	6	15	6,723668	15,69969	-0,723668
65,60000	4	19	3,422030	19,12172	0,577970
$\geq 65,60000$	1	20	0,878279	20,00000	0,121721

## 6.7 Statistička analiza eksperimentalnih podataka

U dostupnoj literaturi ne mogu se pronaći istraživanja koja sadrže podatke vezane za specifične značajke oštećenja ležaja i mogućnosti paljenja eksplozivne atmosfere plinova, para i prašina. Također nije provedena statistička analiza dobivenih podataka iz eksperimentalnih istraživanja.

U tome smislu, ovaj će dio istraživanja obuhvatiti statističku analizu nekih od utjecaja oštećenja kotrljajnih kugličnih ležajeva, čime se namjeravaju utvrditi veze s paljenjem eksplozivne atmosfere. U prvome se redu nastoji utvrditi povezanost temperaturnih krivulja kod kotrljajnih kugličnih ležajeva s različitim mjestima oštećenja i pojave kritično visoke temperature s namjerom postavljanja funkcionalne matematičke međuovisnosti.

Podaci dobiveni eksperimentalnim radom s ispitnim sustavom statistički su analizirani za potrebe ovoga istraživanja, primjenom statističkog programa „Statistica 6.0” [121].

## 6.8 Regresijska analiza

Ulazni podaci za regresijsku analizu su vrijednosti temperatura snimljene tijekom mjerenja od točke koja je odgovarala prijelazu iz stacionarnog stanja (razdoblje II. na slici 6.1) u stanje otkaza (razdoblje III. na slici 6.1) do trenutka prestanka rada (trenutak otkaza odnosno zaribavanja). Za dobivene podatke ispitivanja provedena je eksponencijalna regresija.

### 6.8.1 Regresijska analiza podataka ispitivanja kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem vanjskog prstena

Regresijom se dobiva sljedeća eksponencijalna jednadžba koja opisuje krivulju temperature zagrijavanja kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem vanjskog prstena u vremenu:

$$\mathcal{G}_{vp} = 0,1722 \cdot e^{(0,2673 \cdot t)} \quad (6.1)$$

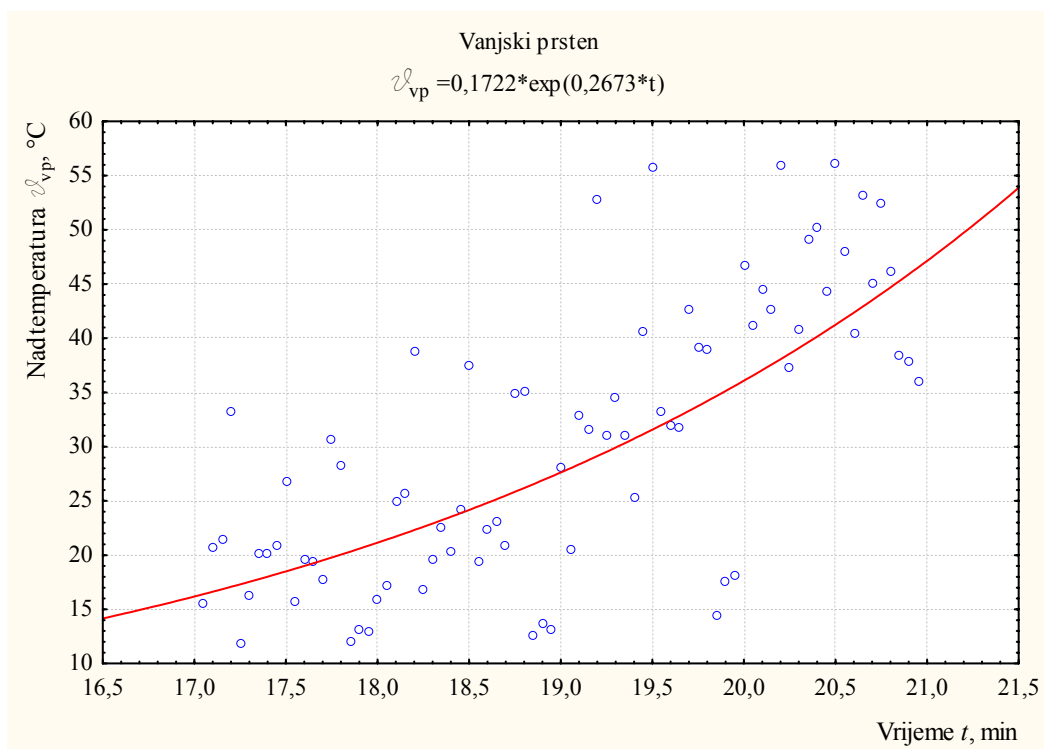
gdje je:

$\mathcal{G}_{vp}$  – vrijednost temperature kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem vanjskog prstena, °C

$t$  – vrijeme, min

Regresijskom analizom dobivena je eksponencijalna krivulja, kroz vrijednosti nadtemperatura dobivenih kao rezultat eksperimentalnog rada prikazana je na slici 6.27.



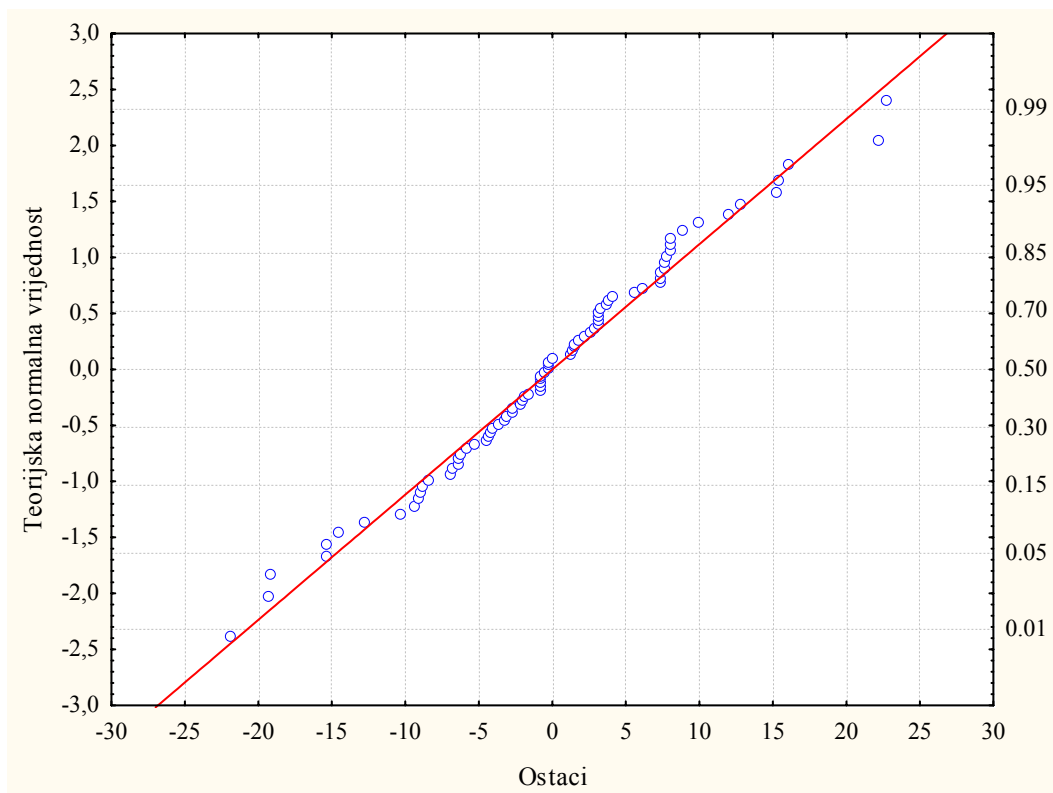


**Slika 6.27** Eksponecijalna regresija nadtemperature kod kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem vanjskog prstena

Grafički prikaz normalne vjerojatnosti ostataka (eng. *Normal probability plot of residuals*) predstavlja omjer stvarnih vrijednosti izmjerenih u eksperimentalnom radu i onih koje bi odgovarale podacima po normalnoj razdiobi (slika 6.28).

Kako su točke mjerenja ravnomjerno raspoređene oko pravca (eng. *Normal probability plot*) može se smatrati da podaci odgovaraju normalnoj razdiobi, što je inače osnovni uvjet primjene analize varijance F-testa (slika 6.28).

Proveden je test normalnosti ostataka za ekspancijalnu regresiju.



**Slika 6.28** Prikaz normalnosti ostataka eksponencijalne regresije temperature  $\mathcal{G}_{vp}$  kod kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem vanjskog prstena

**Tablica 6.13** Parametri eksponencijalne jednadžbe temperaturne krivulje kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem vanjskog prstena

Model temperatura= $a \cdot \exp(\text{vrijeme} \cdot b)$ Zavisna varijabla: Temperatura Razina povjerenja: 95.0% ( $\alpha = 0.050$ )						
	Procjena koeficijenta	Standardna pogreška	t-vrijednost	p-razina	Donja granica intervala	Gornja granica intervala
<b>a</b>	0,176977	0,105899	1,671181	0,098746	-0,033896	0,387850
<b>b</b>	0,268252	0,030410	8,821242	0,000000	0,207699	0,328806

**Tablica 6.14** Analiza varijance za parametar temperaturu  $\mathcal{G}_{vp}$  kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem vanjskog prstena

Model : temperatura= $a \cdot \exp(\text{vrijeme} \cdot b)$ Zavisna varijabla: Temperatura					
	Suma kvadrata odstupanja (SKO)	Stupanj slobode (ss)	Srednji kvadrat (SS)	F-vrijednost	p-vrijednost
<b>Model</b>	79230,81	2	39615,41	513,5024	0,00
<b>Ostatak</b>	5940,35	77	77,15		
<b>Ukupno</b>	85171,17	79			

### 6.8.2 Regresijska analiza podataka ispitivanja kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem unutarnjeg prstena

Regresijom se dobiva sljedeća eksponencijalna jednadžba koja opisuje krivulju temperature zagrijavanja kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem unutarnjeg prstena u vremenu:

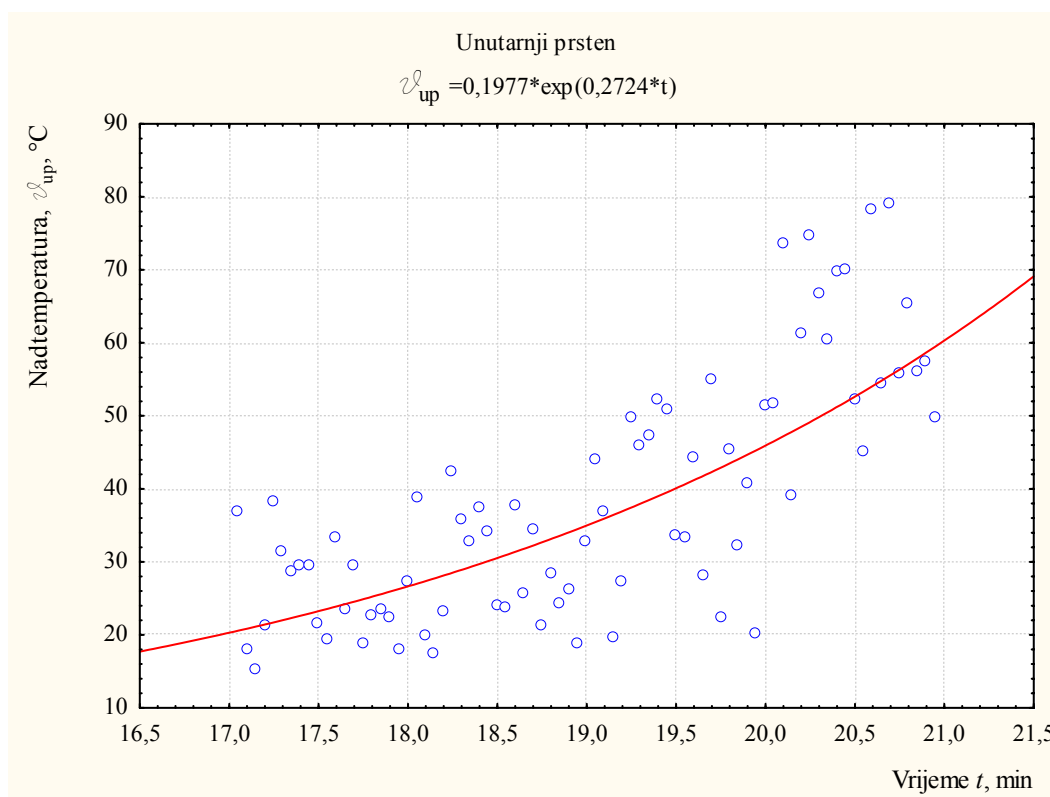
$$\vartheta_{up} = 0,1977 \cdot e^{(0,2724 \cdot t)} \quad (6.2)$$

gdje je:

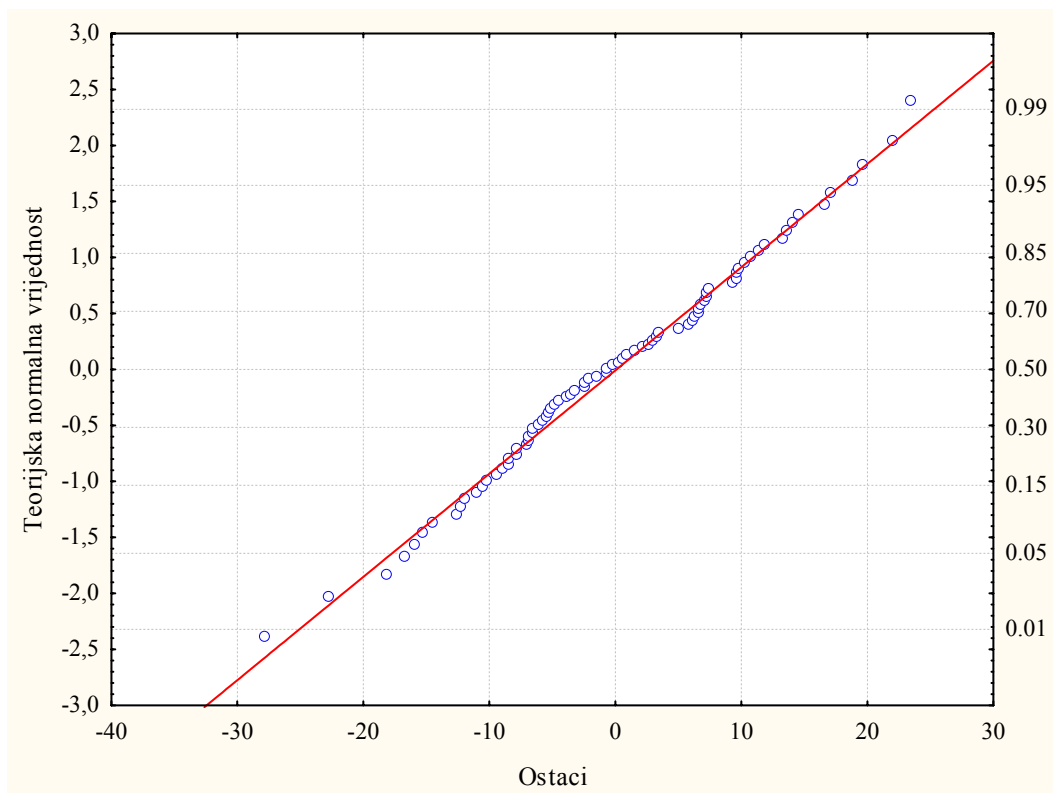
$\vartheta_{up}$  – vrijednost temperature kotrljajnog ležaja s oštećenjem unutarnjeg prstena, °C

$t$  – vrijeme, min

Regresijskom analizom dobivena je eksponencijalna krivulja, kroz vrijednosti nadtemperatura dobivenih kao rezultat eksperimentalnog rada prikazana je na slici 6.29. Grafički prikaz normalne vjerojatnosti ostataka predstavlja omjer stvarnih vrijednosti izmjerenih u eksperimentalnom radu i onih koje bi odgovarale podacima po normalnoj razdiobi. Kako su točke mjerenja ravnomjerno raspoređene oko pravca, može se smatrati da podaci odgovaraju normalnoj razdiobi, što je inače osnovni uvjet primjene analize varijance F-testa (slika 6.30). Proveden je test normalnosti ostataka za eksponencijalnu regresiju.



**Slika 6.29** Eksponencijalna regresija nadtemperature  $\vartheta_{up}$  kod kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem unutarnjeg prstena



**Slika 6.30** Prikaz normalnosti ostataka eksponencijalne regresije temperature  $\mathcal{G}_{up}$  kod kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem unutarnjeg prstena

**Tablica 6.15** Parametri eksponencijalne jednadžbe temperaturne krivulje kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem na unutarnjem prstenu

Model temperatura= $a \cdot \exp(\text{vrijeme} \cdot b)$ Zavisna varijabla: Temperatura Razina povjerenja: 95.0% ( $\alpha = 0.050$ )						
	Procjena koeficijenta	Standardna pogreška	t-vrijednost	p-razina	Donja granica intervala	Gornja granica intervala
<b>a</b>	0,116693	0,068735	1,69773	0,093596	-0,020175	0,253562
<b>b</b>	0,301730	0,029828	10,11551	0,000000	0,242334	0,361126

**Tablica 6.16** Analiza varijance za parametar temperaturu  $\mathcal{G}_{up}$  kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem unutarnjeg prstena

Model : temperatura= $a \cdot \exp(\text{vrijeme} \cdot b)$ Zavisna varijabla: Temperatura					
	Suma kvadrata odstupanja (SKO)	Stupanj slobode (ss)	Srednji kvadrat (SS)	F-vrijednost	p-vrijednost
<b>Model</b>	128691,2	2	64345,59	561,9873	0,00
<b>Ostatak</b>	8816,2	77	114,50		
<b>Ukupno</b>	137507,4	79			

### 6.8.3 Regresijska analiza podataka ispitivanja kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem kaveza

Regresijom se dobiva sljedeća eksponencijalna jednadžba koja opisuje krivulju temperature zagrijavanja kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem kaveza u vremenu:

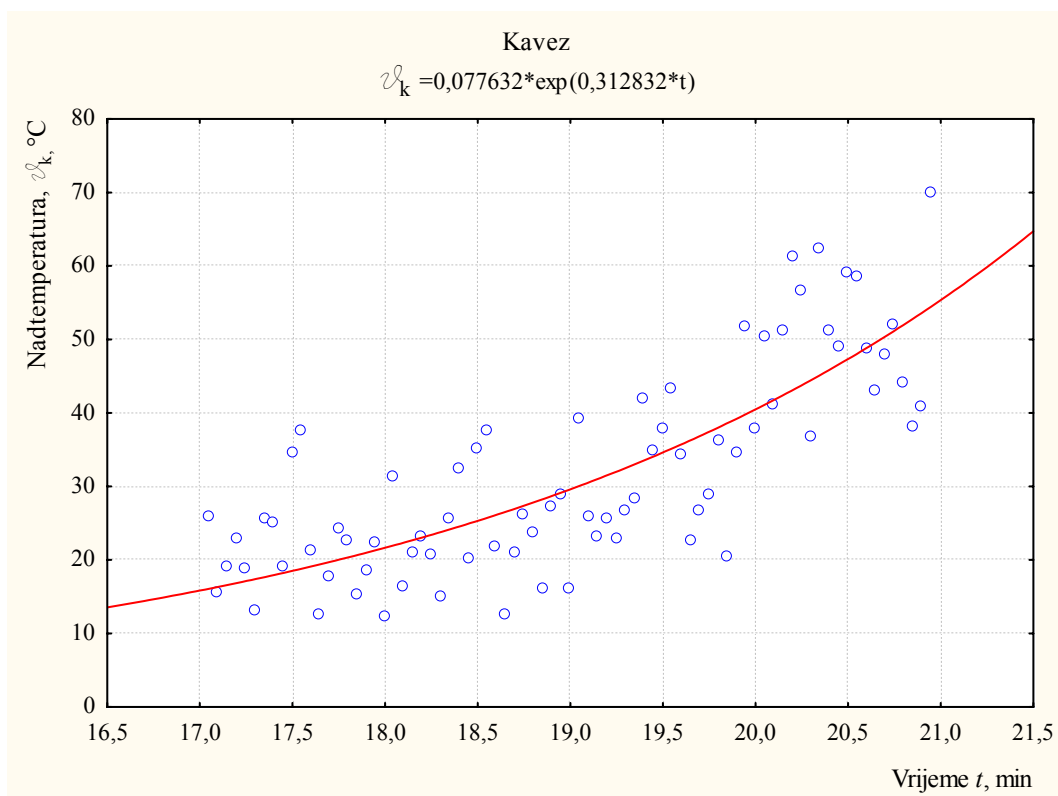
$$\vartheta_k = 0,077632 \cdot e^{(0,312832 \cdot t)} \quad (6.3)$$

gdje je:

$\vartheta_k$  – vrijednost temperature kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem kaveza, °C

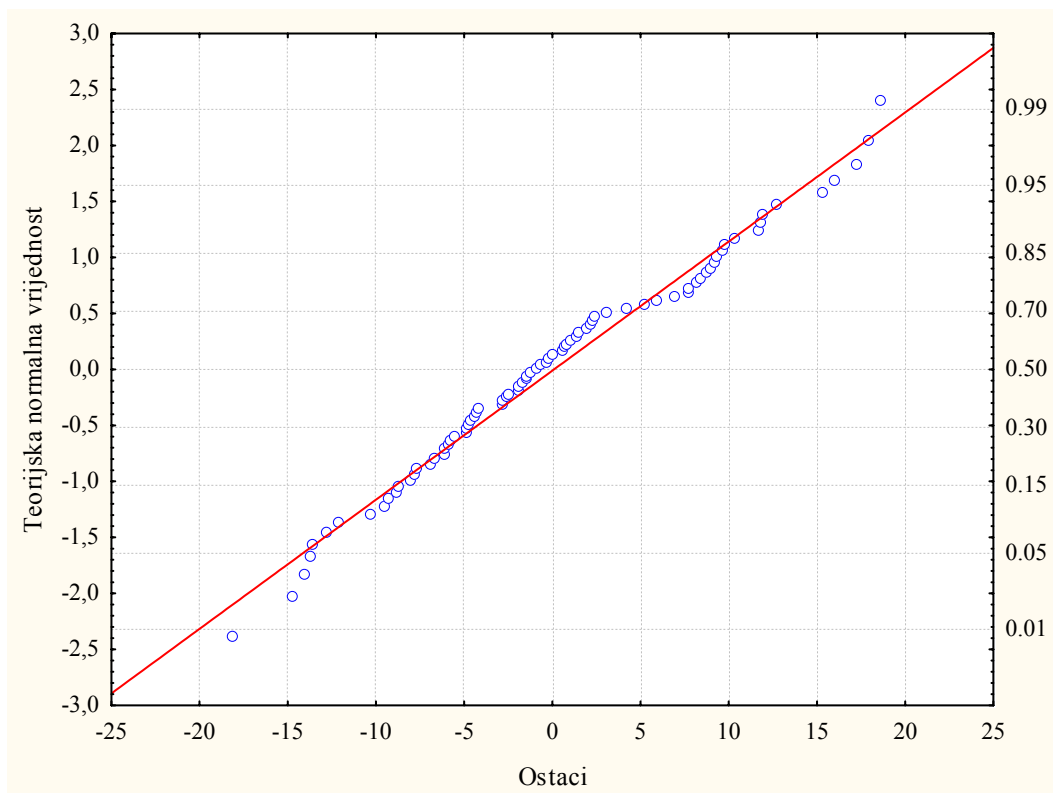
$t$  – vrijeme, min

Regresijskom analizom dobivena je eksponencijalna krivulja, kroz vrijednosti nadtemperatura dobivenih kao rezultat eksperimentalnog rada prikazana je na slici 6.31.



**Slika 6.31** Eksponencijalna regresija nadtemperature  $\vartheta_k$  kod kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem kaveza

Grafički prikaz normalne vjerojatnosti ostataka (eng. *Normal probability plot of residuals*) predstavlja omjer stvarnih vrijednosti izmjerenih u eksperimentalnom radu i onih koje bi odgovarale podacima po normalnoj razdiobi (slika 6.32). Kako su točke mjerenja ravnomjerno raspoređene oko pravca, može se smatrati da podaci odgovaraju normalnoj razdiobi, što je inače osnovni uvjet primjene analize varijance F-testa (slika 6.32). Proveden je test normalnosti ostataka za eksponencijalnu regresiju.



**Slika 6.32** Prikaz normalnosti ostataka eksponencijalne regresije temperature  $\mathcal{G}_k$  kod kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem kaveza

**Tablica 6.17** Parametri eksponencijalne jednadžbe temperaturne krivulje kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem kaveza

Model temperatura= $a \cdot \exp(\text{vrijeme} \cdot b)$ Zavisna varijabla: Temperatura Razina povjerenja: 95.0% ( $\alpha = 0.050$ )						
	Procjena koeficijenta	Standardna pogreška	t-vrijednost	p-razina	Donja granica intervala	Gornja granica intervala
<b>a</b>	0,077632	0,044430	1,74729	0,084574	-0,010839	0,166103
<b>b</b>	0,312832	0,028949	10,80648	0,000000	0,255188	0,370476

**Tablica 6.18** Analiza varijance za parametar temperaturu  $\mathcal{G}_k$  kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem kaveza

Model : temperatura= $a \cdot \exp(\text{vrijeme} \cdot b)$ Zavisna varijabla: Temperatura					
	Suma kvadrata odstupanja (SKO)	Stupanj slobode (ss)	Srednji kvadrat (SS)	F-vrijednost	p-vrijednost
<b>Model</b>	88269,21	2	44134,60	607,5138	0,00
<b>Ostatak</b>	5593,89	77	72,65		
<b>Ukupno</b>	93863,10	79			

## 6.9 Analiza varijance (ANOVA)

### 6.9.1 Usporedba stacionarnog stanja temperaturne krivulje analizom varijance (ANOVA)

Stacionarno stanje je između početnog i završnog dijela na temperaturnoj krivulji; to jest, to je vrijeme od točke na temperaturnoj krivulji koja označava završetak razdoblja početka rada do točke kad se pojavilo odstupanje promjene temperature veće od 3 °C. Zapravo je to područje rada kotrljajnog kugličnog ležaja nakon početnog zagrijavanja, odnosno ustaljivanja temperature kod pojedinog oštećenja, ali i bez oštećenja, s brzinom promjene temperature manjom od 3 °C/min. Stacionarno stanje završava kada dođe do povišenja temperature u iznosu od 3 °C/min, tj. u tome trenutku započinje razdoblje otkaza (zaribavanja) kotrljajnog kugličnog ležaja.

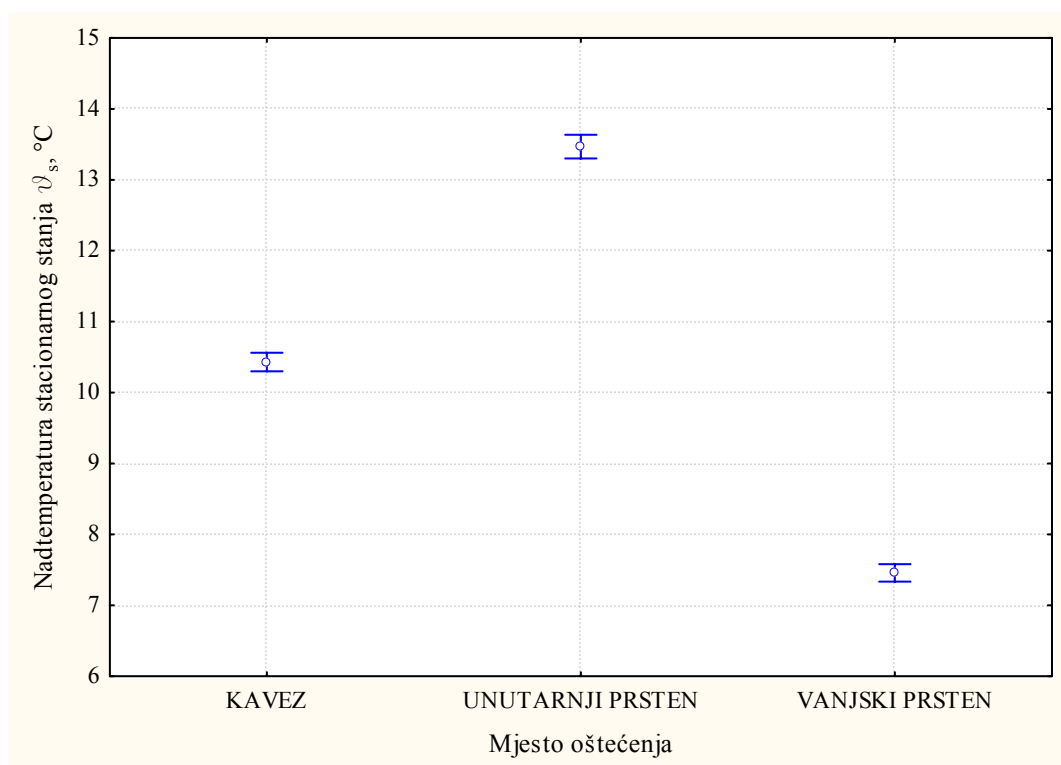
Tablica analize varijance (eng. *Analysis of Variance*) pokazuje izrazitu značajnost razlika među temperaturama početka otkaza  $\mathcal{G}_s$ , uz vjerojatnost pogreške prve vrste jednake 0,05 (tablica 6.19).

Na slici 6.33 vidljivi su intervali povjerenja s najvećim i najmanjim vrijednostima unutar kojih će se ostvariti stvarna vrijednost statističke mjere (npr. srednja vrijednost) uz 95 %.

**Tablica 6.19** Analiza varijance za stacionarno stanje temperaturne krivulje kotrljajnog kugličnog ležaja

Test značajnosti razlika za STACIONARNO STANJE					
	Suma kvadrata odstupanja (SKO)	Stupnjevi slobode (ss)	Srednji kvadrat odstupanja (SS)	Vrijednost F	Vjerojatnost p
<b>Ukupno</b>	65492,9	4886	-	-	-
<b>Tip oštećenja</b>	26607,3	2	13303,7	1670,93	0,00
<b>Pogreška</b>	38885,6	4884	8,0	-	-

Uspoređujući temperature u stacionarnom stanju  $\mathcal{G}_s$  pojedinih kotrljajnih kugličnih ležajeva s različitim mjestima oštećenja, vidljivo je da je  $\mathcal{G}_s$  kod ležaja s oštećenjem vanjskog prstena najniža. Odnosno, kod kotrljajnog ležaja s oštećenjem vanjskog prstena temperatura u stacionarnom stanju ostaje najniža. U kotrljajnom kugličnom ležaju s oštećenjem unutarnjeg prstena pojavljuje se najviša temperatura u stacionarnom stanju  $\mathcal{G}_s$ .



**Slika 6.33** Usporedba nadtemperatura u stacionarnom stanju  $\theta_s$  kotrljajnog kugličnog ležaja u ovisnosti o mjestu oštećenja

**Tablica 6.20** Tablica usporedbi statističkih parametara za različita mjesta oštećenja

	Razina	N	Aritmetička sredina	Std. odstupanje	Std. greška	-95,00%	+95,00%
Tip oštećenja	Kavez	1763	10,43030	3,073390	0,073197	10,28674	10,57387
	Unutarnji prsten	1104	13,46776	2,180691	0,065631	13,33898	13,59653
	Vanjski prsten	2020	7,45662	2,901474	0,064557	7,33001	7,58322

### 6.9.2 Usporedba bitnih parametara na paljenje eksplozivne atmosfere analizom varijance (ANOVA)

Usporedba vremena početka otkaza  $t_{po}$ , temperature početka otkaza  $\theta_{po}$ , vremena otkaza (zaribavanja)  $t_z$  i temperature otkaza (zaribavanja)  $\theta_z$  provodi se za razdoblje nakon stacionarnog stanja. To jest, u razdoblju III. rada kotrljajnog kugličnog ležaja prema slici 6.1.

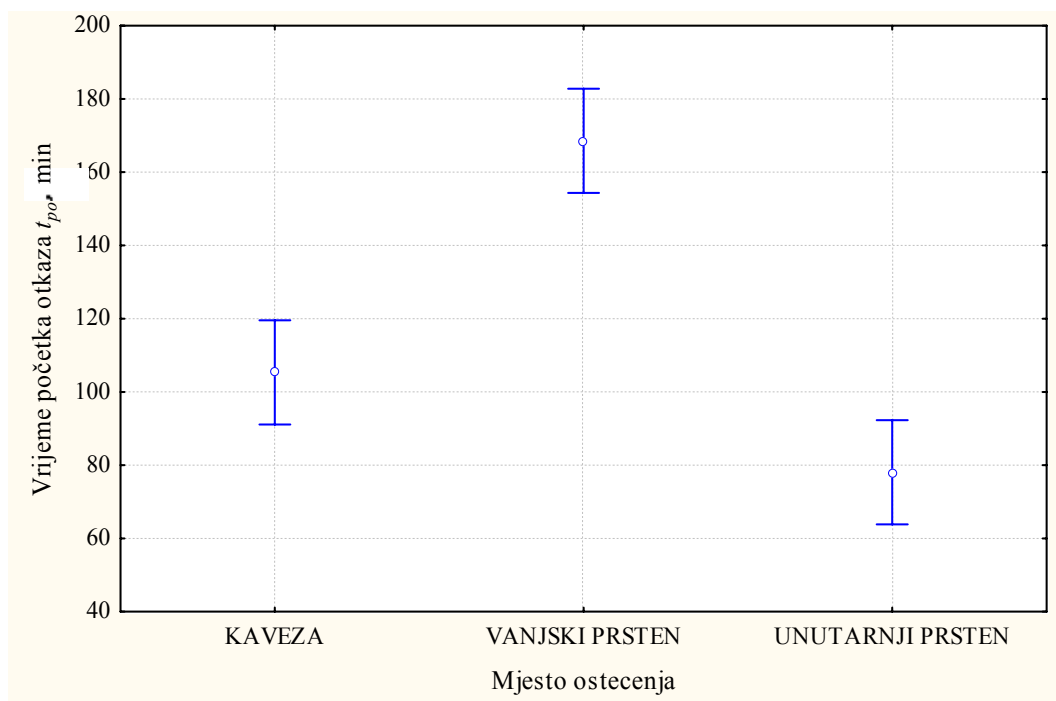


### 6.9.3 Usporedba vremena početka otkaza $t_{po}$ analizom varijance (ANOVA)

**Tablica 6.21** Analiza varijance za vrijeme početka otkaza  $t_{po}$

Test značajnosti razlika za VRIJEME OTKAZA					
	Suma kvadrata odstupanja (SKO)	Stupnjevi slobode (ss)	Srednji kvadrat odstupanja (SS)	Vrijednost F	Vjerojatnost p
<b>Ukupno</b>	143754,6	59	-	-	-
<b>Tip oštećenja</b>	86222,5	2	43111,3	42,71	0,00
<b>Pogreška</b>	57532,1	57	1009,3	-	-

Tablica analize varijance pokazuje izrazitu značajnost razlika između vremena početka otkaza  $t_{po}$ , uz vjerojatnost pogreške prve vrste jednake 0,05 (tablica 6.21). Vidljivi su intervali povjerenja s najvećim i najmanjim vrijednostima unutar kojih će se ostvariti stvarna vrijednost statističke mjere (npr. srednja vrijednost) uz 95 % (slika 6.34). Uspoređujući vremena početka otkaza  $t_{po}$  za različita mjesta oštećenja kotrljajnog ležaja, vidljivo je da je  $t_{po}$  za vanjski prsten najduže. To jest, ležaj s oštećenjem vanjskog prstena ostaje u radu najduže. Kod kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem unutarnjeg prstena najbrže se pojavljuju promjene vezane za parametre bitne za paljenje eksplozivne atmosfere.



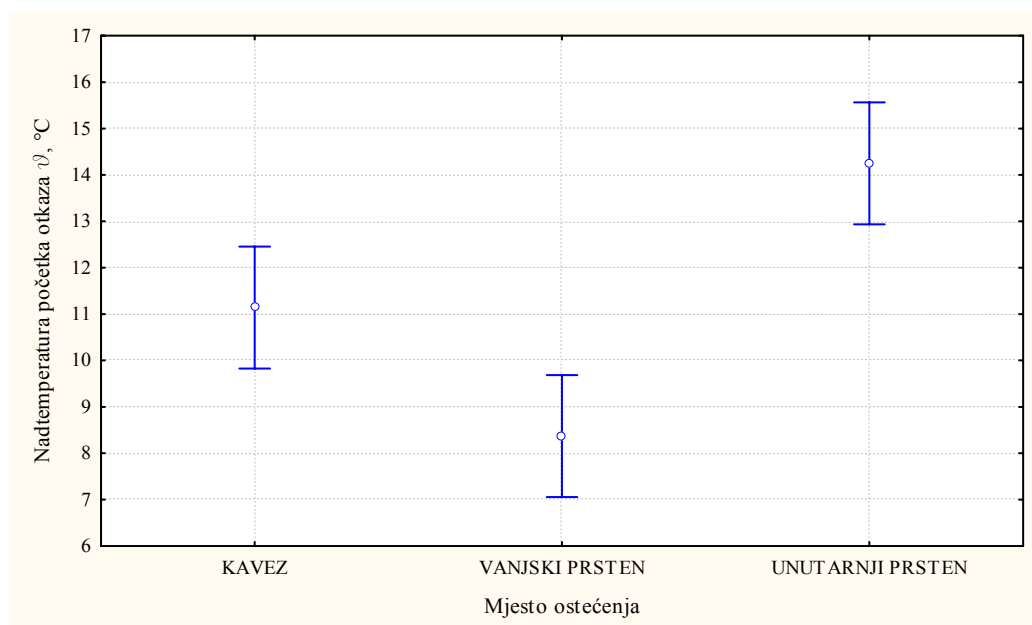
**Slika 6.34** Usporedba vremena početka otkaza  $t_{po}$  kotrljajnog kugličnog ležaja u ovisnosti o mjestu oštećenja

### 6.9.4 Usporedba temperature početka otkaza $\mathcal{G}_{po}$ analizom varijance (ANOVA)

**Tablica 6.22** Analiza varijance za temperature početka otkaza  $\mathcal{G}_{po}$

Test značajnosti razlika za TEMPERATURE OTKAZA					
	Suma kvadrata odstupanja (SKO)	Stupnjevi slobode (ss)	Srednji kvadrat odstupanja (SS)	Vrijednost F	Vjerojatnost p
<b>Ukupno</b>	838,27	59	-	-	-
<b>Tip oštećenja</b>	346,12	2	173,06	20,04	0,00
<b>Pogreška</b>	492,15	57	8,634	-	-

Tablica analize varijance pokazuje izrazitu značajnost razlika među temperaturama početka otkaza  $\mathcal{G}_{po}$ , uz vjerojatnost pogreške prve vrste jednake 0,05 (tablica 6.22). Na slici 6.35 vidljivi su intervali povjerenja s najvećim i najmanjim vrijednostima unutar kojih će se ostvariti stvarna vrijednost statističke mjere (npr. srednja vrijednost) uz 95 %. Uspoređujući temperature početka otkaza  $\mathcal{G}_{po}$  za različita mjesta oštećenja kotrljajnog ležaja, vidljivo je da je  $\mathcal{G}_{po}$  za vanjski prsten najniža. To jest, kod kotrljajnog ležaja s oštećenjem vanjskog prstena, temperatura početka otkaza  $\mathcal{G}_{po}$  ostaje najniža. U kotrljajnom kugličnom ležaju s oštećenjem unutarnjeg prstena pojavljuje se najviša temperatura početka otkaza  $\mathcal{G}_{po}$ .



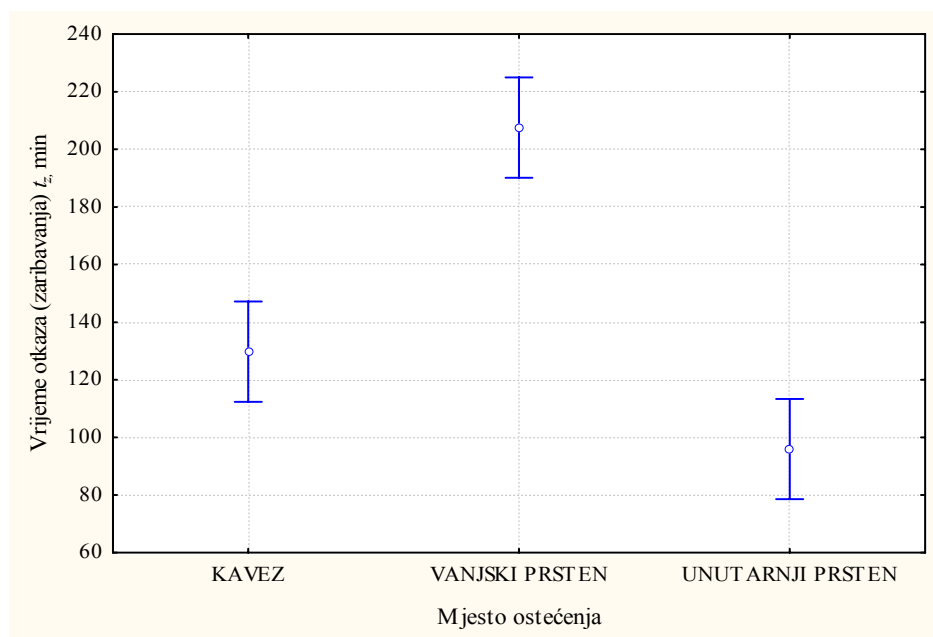
**Slika 6.35** Usporedba nadtemperature početka otkaza  $\mathcal{G}_{po}$  kotrljajnog kugličnog ležaja u ovisnosti o mjestu oštećenja

### 6.9.5 Usporedba vremena otkaza (zaribavanja) $t_z$ analizom varijance (ANOVA)

**Tablica 6.23** Analiza varijance za vrijeme otkaza (zaribavanja)  $t_z$

Test značajnosti razlika za <b>VRIJEME ZARIBAVANJA</b>					
	Suma kvadrata odstupanja (SKO)	Stupnjevi slobode (ss)	Srednji kvadrat odstupanja (SS)	Vrijednost F	Vjerojatnost p
<b>Ukupno</b>	217325	59	-	-	-
<b>TIP OŠTEĆENJA</b>	130999	2	65499	43,24	0,00
<b>Pogreška</b>	86326	57	1514	-	-

Tablica analize varijance pokazuje izrazitu značajnost razlika između vremena otkaza (zaribavanja)  $t_z$ , uz vjerojatnost pogreške prve vrste jednake 0,05 (tablica 6.23). Na slici 6.36 vidljivi su intervali povjerenja s najvećim i najmanjim vrijednostima unutar kojih će se ostvariti stvarna vrijednost statističke mjere (npr. srednja vrijednost) uz 95 %. Uspoređujući vremena otkaza (zaribavanja)  $t_z$  za različita mjesta oštećenja kotrljajnog ležaja, vidljivo je da je  $t_z$  za vanjski prsten najduže. To jest, kod kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem vanjskog prstena trenutak zaribavanja dogodit će se najkasnije. U kotrljajnom kugličnom ležaju s oštećenjem unutarnjeg prstena najbrže se pojavljuju promjene vezane za parametre bitne za paljenje eksplozivne atmosfere. To jest, trenutak otkaza (zaribavanja) kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem unutarnjeg prstena događa se najranije.



**Slika 6.36** Usporedba vremena otkaza (zaribavanja)  $t_z$  kotrljajnog kugličnog ležaja u ovisnosti o mjestu oštećenja

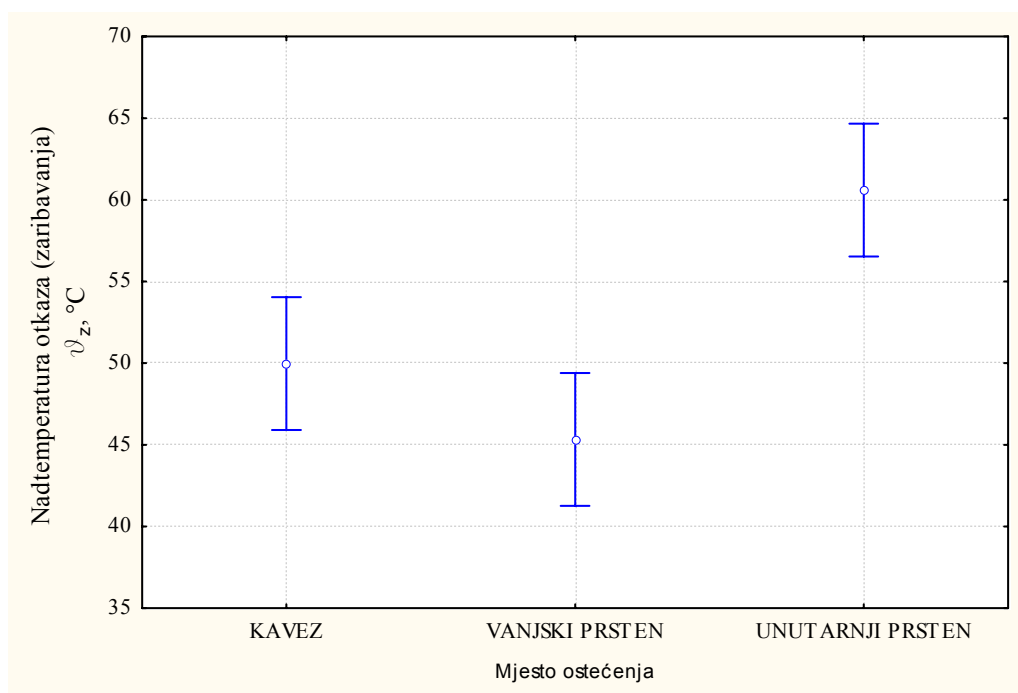
### 6.9.6 Usporedba temperature otkaza (zaribavanja) $\vartheta_z$ analizom varijance (ANOVA)

Tablica analize varijance pokazuje izrazitu značajnost razlika među temperaturama otkaza (zaribavanja)  $\vartheta_z$ , uz vjerojatnost pogreške prve vrste jednake 0,05 (tablica 6.24).

**Tablica 6.24** Analiza varijance za temperature otkaza (zaribavanja)  $\vartheta_z$

Test značajnosti razlika za TEMPERATURE OTKAZA (ZARIBAVANJA)					
	Suma kvadrata odstupanja (SKO)	Stupnjevi slobode (ss)	Srednji kvadrat odstupanja (SS)	Vrijednost F	Vjerojatnost p
<b>Ukupno</b>	7147,5	59	-	-	-
<b>TIP OŠTEĆENJA</b>	2449,1	2	1224,5	14,85	0,00
<b>Pogreška</b>	4697,8	57	82,4	-	-

Na slici 6.37 vidljivi su intervali povjerenja s najvećim i najmanjim vrijednostima unutar kojih će se ostvariti stvarna vrijednost statističke mjere (npr. srednja vrijednost) uz 95 %. Uspoređujući temperature otkaza (zaribavanja)  $\vartheta_z$  za različita mjesta oštećenja kotrljajnog ležaja, vidljivo je da je  $\vartheta_z$  za vanjski prsten najniže. U kotrljajnom kugličnom ležaju s oštećenjem unutarnjeg prstena pojavljuje se najviša temperatura otkaza (zaribavanja)  $\vartheta_z$ . To jest, kod kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem unutarnjeg prstena pojavljuje se najviši utjecajni parametar na paljenje eksplozivne atmosfere.

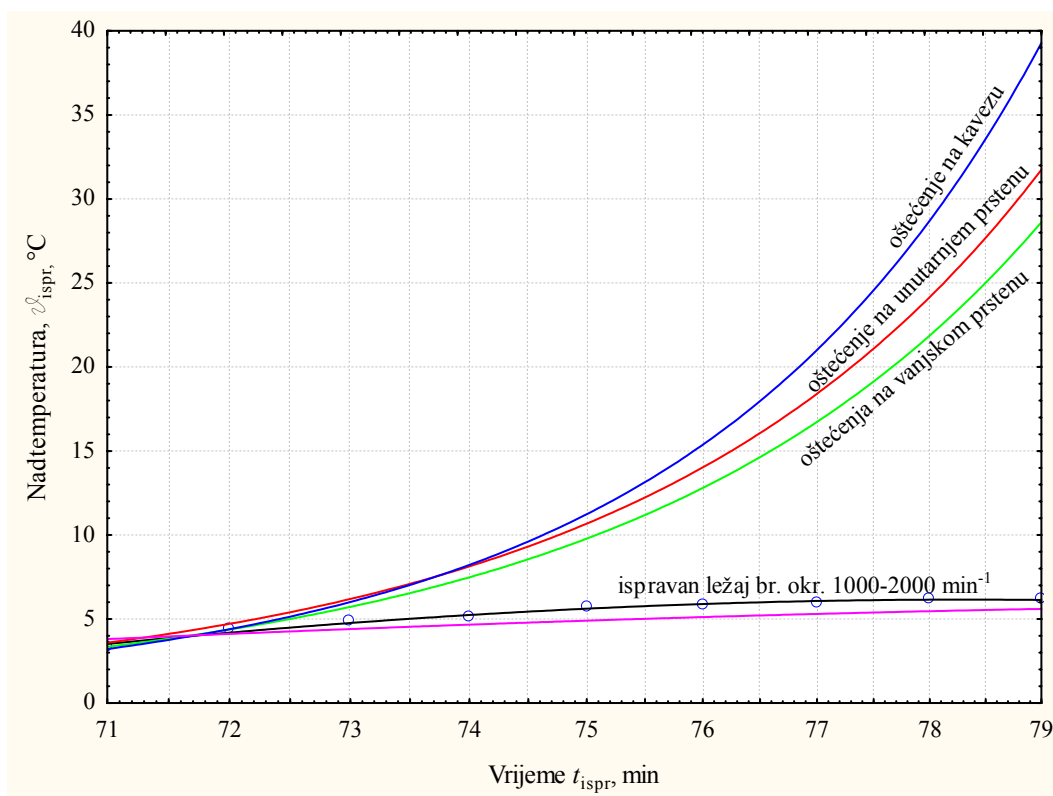


**Slika 6.37** Usporedba nadtemperature otkaza (zaribavanja)  $\vartheta_z$  kotrljajnog kugličnog ležaja u ovisnosti o mjestu oštećenja

### 6.10 Usporedba temperaturne krivulje ispravnog kotrljajnog kugličnog ležaja s promjenom broja okretaja i temperaturnih krivulja kotrljajnih kugličnih ležajeva s oštećenjima u trenutku otkazivanja

Provedena je usporedba temperaturnih krivulja kotrljajnih kugličnih ležajeva s oštećenjima kaveza, vanjskog i unutarnjeg prstena te temperaturne krivulje dobivene ispitivanjem tj. povećanjem broja okretaja ispravnog kotrljajnog kugličnog ležaja. U svrhu usporedbe uzet je dio temperaturne krivulje povećanja broja okretaja sa  $1000 \text{ min}^{-1}$  na  $2000 \text{ min}^{-1}$  ispravnog kotrljajnog kugličnog ležaja (slika 6.5).

Cilj usporedbe je odbacivanje mogućnosti zamjene porasta temperature kod ispravnog kotrljajnog kugličnog ležaja ukoliko dođe do promjene (povećanja) broja okretaja (npr. frekventno upravljana električna oprema) i porasta temperature u kotrljajnim kugličnim ležajevima s oštećenjem u razdoblju otkazivanja (razdoblje III, slika 6.1).



**Slika 6.38** Usporedba temperaturnih krivulja ispravnog kotrljajnog kugličnog ležaja s povećanjem broja okretaja i kotrljajnih kugličnih ležajeva s različitim oštećenjima

Porast temperature u vremenu od 71 min do 79 min prema temperaturnoj krivulji ispravnog kotrljajnog kugličnog ležaja kod povećanja broja okretaja sa  $1000 \text{ min}^{-1}$  na  $2000 \text{ min}^{-1}$  (slika

6.5) iznosi od 3,5 °C do 6,3 °C. Uspoređujući temperaturne krivulje kotrljajnih kugličnih ležajeva s oštećenjima kaveza te vanjskog ili unutarnjeg prstena u istom razdoblju, vidljiv je značajan (eksponencijalni) porast temperature (slika 6.38).

Porast temperature kod kotrljajnih kugličnih ležajeva u razdoblju od 71 min do 79 min s oštećenjem:

- kaveza iznosi od 3,5 °C do 39 °C,
- unutarnjeg prstena iznosi od 3,5 °C do 31,5 °C,
- vanjskog prstena iznosi od 3,5 °C do 28,5 °C.

## 6.11 Analiza predviđanja

### 6.11.1 Analiza predviđanja temperature kotrljajnih kugličnih ležajeva s oštećenjem vanjskog prstena

Ispitnim sustavom dobivene su temperature otkaza (zaribavanja)  $\mathcal{G}_z$  kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem vanjskog prstena prikazane na histogramu (slika 6.15).

Regresijskom analizom vrijednosti temperatura zagrijavanja kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem vanjskog prstena dobivena je eksponencijalna jednadžba prema izrazu 6.1.

Zapravo, izraz 6.1 opisuje porast temperature u ovisnosti o vremenu u razdoblju otkaza (zaribavanja) kotrljajnog kugličnog ležaja. Kako bi se izrazilo vrijeme dostizanja pojedinih temperatura (temperaturnih razreda, tj. temperatura paljenja plinova, para i prašina), potrebno je iz izraza 6.1 vrijeme  $t$  izraziti kao:

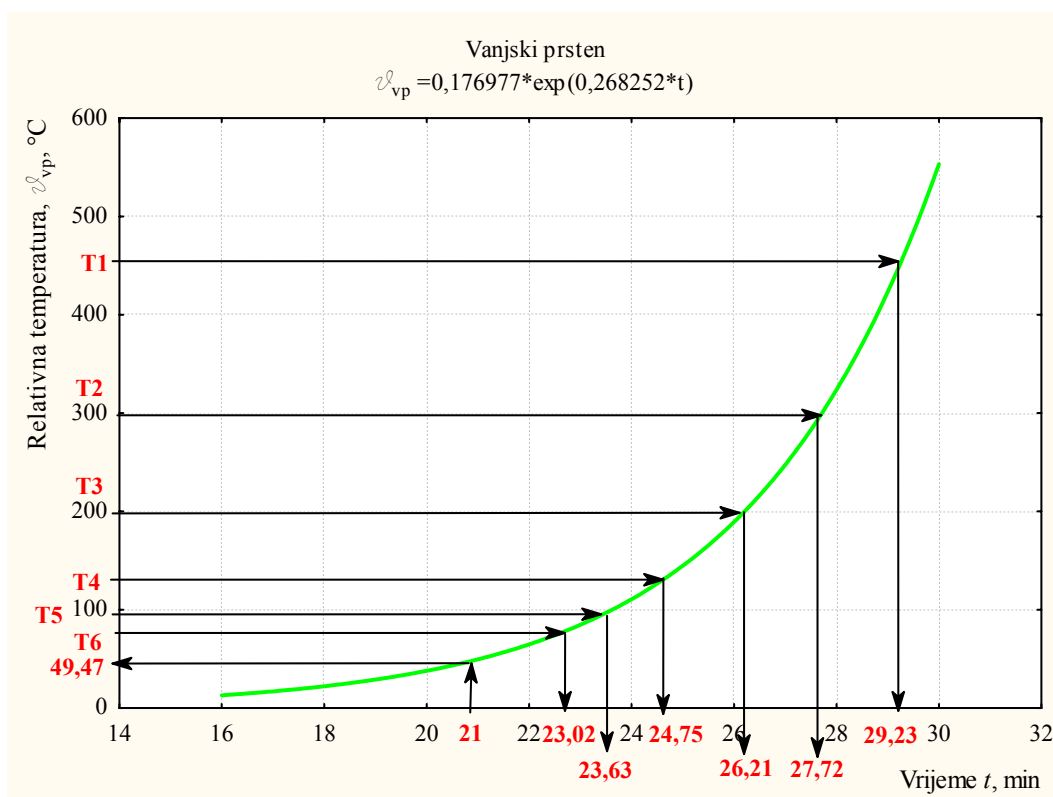
$$t = 3,72783 \cdot \ln \frac{\mathcal{G}}{0,176977} \text{ (min)} \quad (6.4)$$

Vrijeme  $t=21$  min označava trenutak nakon kojeg se provodi predikcija. Granice kritično visoke temperature određene prema temperaturnim razredima dane su u tablici 6.25. U vremenu prestanka rada kotrljajnog kugličnog ležaja prema izrazu 6.1 temperatura iznosi 49,47 °C. U samom eksperimentalnom istraživanju to je bio trenutak koji označava prestanak rada kotrljajnog kugličnog ležaja, odnosno trenutak kada je nastupio otkaz (zaribavanje).

Prediktivno vrijeme možemo jednostavno izraziti:

$$t_{pred} = t - 21 \text{ (min)} \quad (6.5)$$

### 6.11.1.1 Analiza predviđanja temperature kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem vanjskog prstena u ovisnosti o temperaturnim razredima



**Slika 6.39** Model predviđanja vremena dostizanja temperatura pojedinih temperaturnih razreda kod kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem vanjskog prstena

Ako se u izraz 6.4 uvrste vrijednosti temperature pojedinog temperaturnog razreda, dobiva se vrijeme kad se postiže temperatura paljenja plinova i para koji pripadaju tom temperaturnom razredu. Tako npr. kotrljajni kuglični ležaj dostiže temperaturu temperaturnog razreda T3=200 °C prema izrazu 6.4 u prediktivnom vremenu od 5,21 min (tablica 6.25).

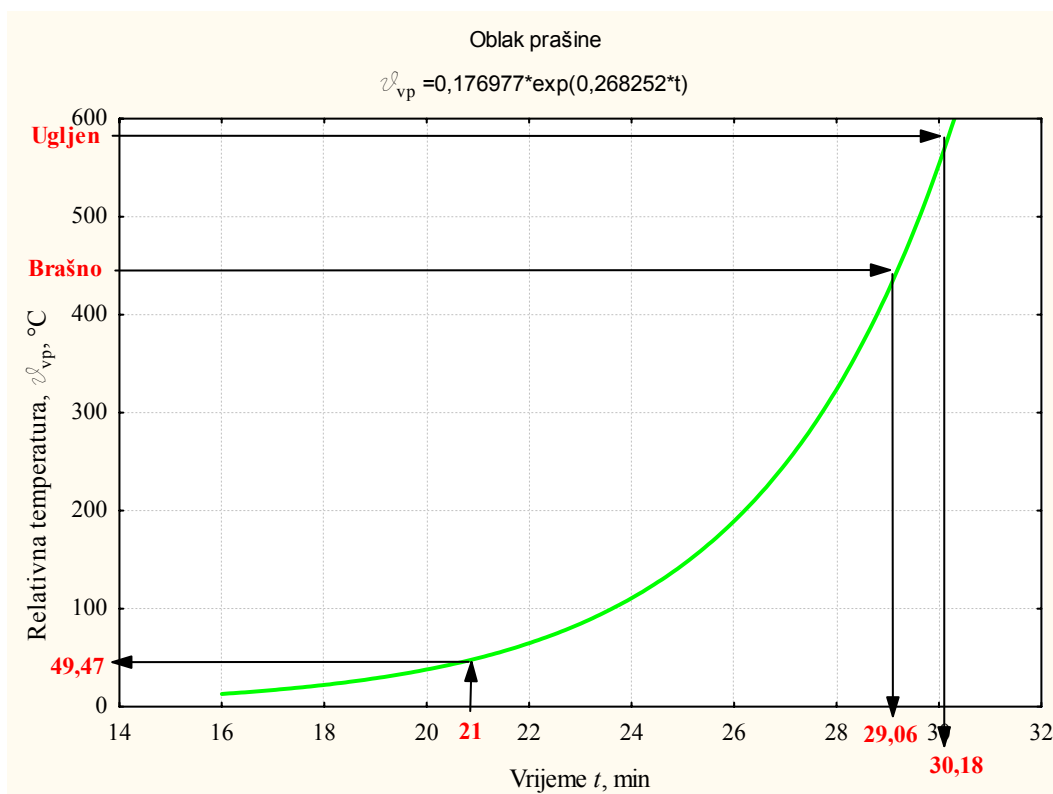
Sliku 6.39 može se prikazati i u obliku tablice gdje su prikazana vremena dostizanja pojedinih temperatura temperaturnih razreda. Prema dobivenom izrazu 6.4, vrijednost temperaturnog razreda T1=450 °C dostiže se za 8,23 min. U praksi, za rotacijsku električnu i strojnu opremu u eksplozivnoj atmosferi postrojenja dostizanje temperaturnog razreda T1=450 °C znači paljenje svih plinova i para.

**Tablica 6.25** Vrijeme dostizanja temperature pojedinog temperaturnog razreda kod kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem vanjskog prstena

	Temperaturni razred					
	T6	T5	T4	T3	T2	T1
	85 °C	100 °C	135 °C	200 °C	300 °C	450 °C
Vrijeme $t$ (min)	23,02	23,63	24,75	26,21	27,72	29,23
Prediktivno vrijeme $t_{pred}$ (min) (proteklo nakon trenutaka zaribavanja)	2,02	2,63	3,75	5,21	6,72	8,23

### 6.11.1.2 Analiza predviđanja temperature kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem vanjskog prstena u ovisnosti o temperaturi paljenja oblaka prašine

Ako se u izraz 6.4 uvrste vrijednosti temperature paljenja oblaka zapaljiva prašine, dobiva se vrijeme kad se postiže temperatura paljenja oblaka (slika 6.40). Tako npr. kotrljajni kuglični ležaj dostiže temperaturu paljenja oblaka prašine pšeničnog brašna od 430 °C u vremenu od 8,06 min, a temperaturu paljenja oblaka ugljene prašine od 580 °C u vremenu od 9,18 min (tablica 6.26).



**Slika 6.40** Model predviđanja vremena dostizanja temperatura paljenja oblaka zapaljive prašine kod kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem vanjskog prstena

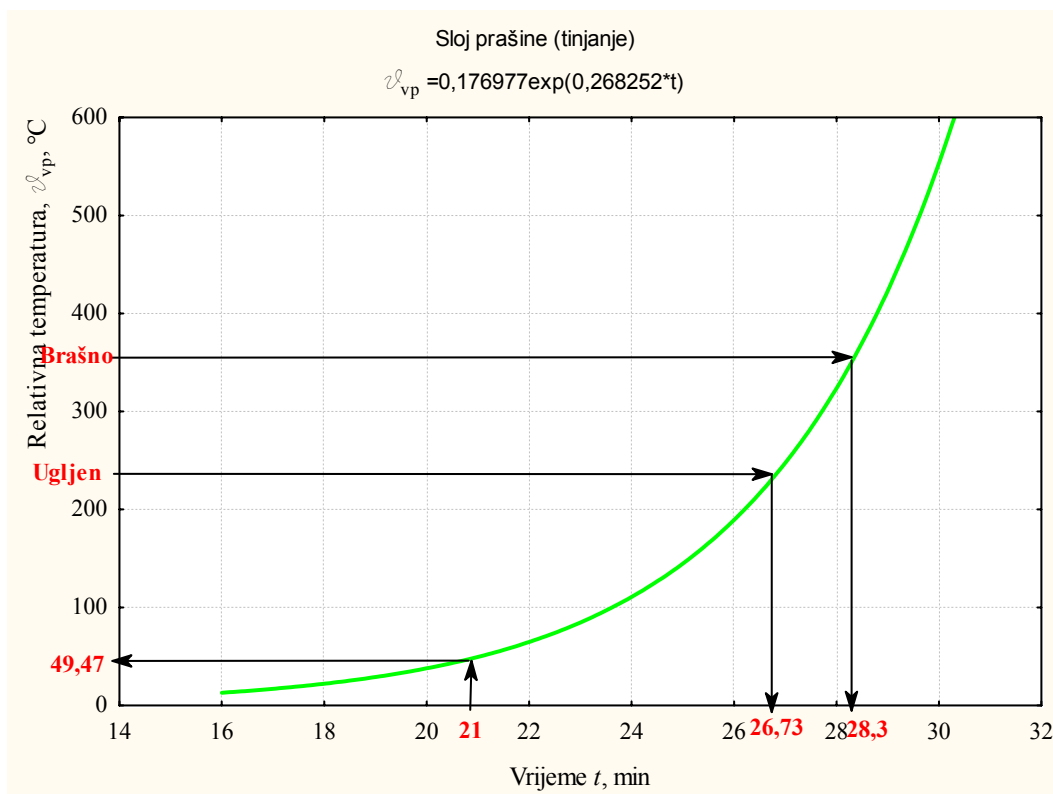


**Tablica 6.26** Vrijeme dostizanja temperature paljenja oblaka zapaljive prašine kod kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem vanjskog prstena

	Zapaljiva prašina	
	Brašno 430 °C	Ugljen 580 °C
Vrijeme (min)	29,06	30,18
Prediktivno vrijeme (min) (proteklo nakon trenutaka zaribavanja)	8,06	9,18

### 6.11.1.3 Analiza predviđanja temperature kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem vanjskog prstena u ovisnosti o temperaturi paljenja sloja prašine

Ako se u izraz 6.4 uvrste vrijednosti temperature paljenja sloja zapaljive prašine, dobiva se vrijeme kada se postiže temperatura paljenja sloja zapaljive prašine (slika 6.41). Tako da npr. kotrljajni kuglični ležaj dostiže temperaturu paljenja sloja ugljene prašine od 230 °C u vremenu od 5,73 min, a temperaturu paljenja sloja prašine pšeničnog brašna od 350 °C u vremenu od 7,3 min (tablica 6.27).



**Slika 6.41** Model predviđanja vremena dostizanja temperature paljenja sloja zapaljive prašine kod kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem vanjskog prstena

**Tablica 6.27** Vrijeme dostizanja temperature paljenja sloja zapaljive prašine kod kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem vanjskog prstena

	Zapaljiva prašina	
	Brašno	Ugljen
	230 °C	350 °C
Vrijeme (min)	26,73	28,3
Prediktivno vrijeme (min) (protoklo nakon trenutaka zaribavanja)	5,73	7,3

### 6.11.2 Analiza predviđanja temperature kotrljajnih kugličnih ležajeva s oštećenjem unutarnjeg prstena

Ispitnim sustavom dobivene su temperature otkaza (zaribavanja)  $\vartheta_z$  kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem unutarnjeg prstena prikazane na histogramu (slika 6.21).

Regresijskom analizom vrijednosti temperatura zagrijavanja kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem unutarnjeg prstena dobivena je eksponencijalna jednadžba prema izrazu 6.2

Zapravo, izraz 6.2 opisuje porast temperature u ovisnosti o vremenu u razdoblju otkaza (zaribavanja) kotrljajnog kugličnog ležaja. Kako bi se izrazilo vrijeme dostizanja pojedinih temperatura (temperaturnih razreda, odnosno temperature paljenja plinova, para i prašina), potrebno je iz izraza 6.2 vrijeme izraziti kao:

$$t = 3,67107 \cdot \ln \frac{\vartheta}{0,1977} \text{ (min)} \quad (6.6)$$

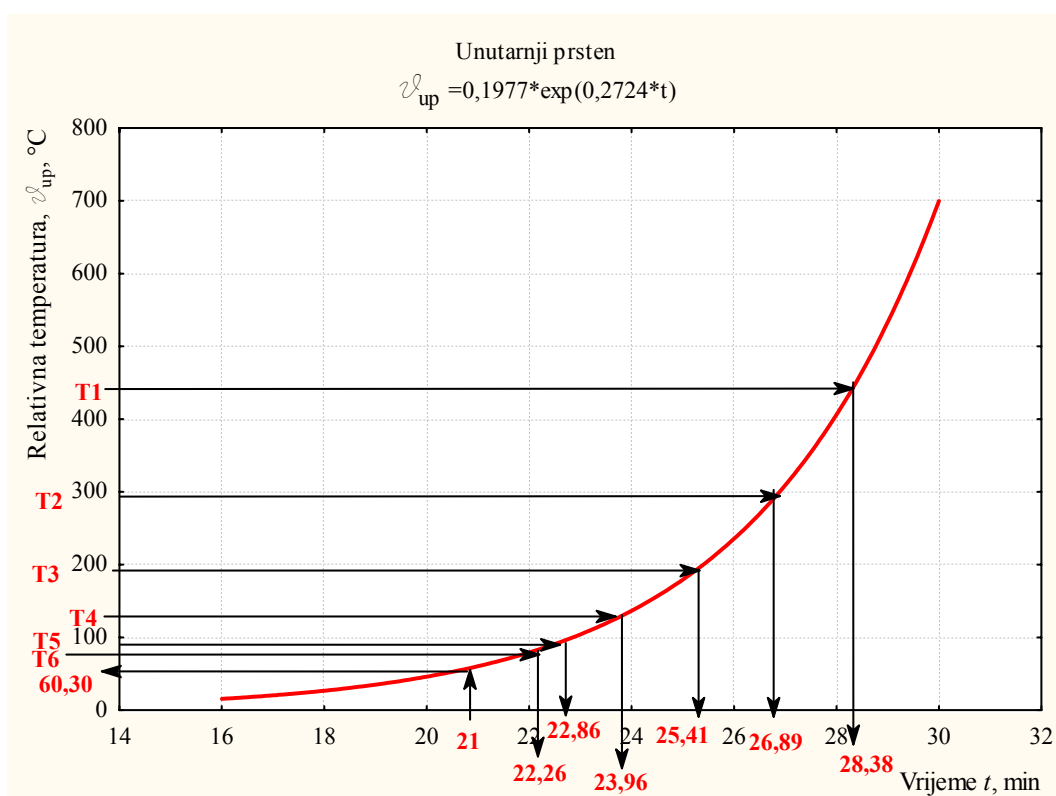
Vrijeme  $t=21$  min označava trenutak nakon kojeg se provodi predikcija. Granice kritično visoke temperature određene prema temperaturnim razredima dane su u tablici 6.28. U vremenu prestanka rada kotrljajnog kugličnog ležaja prema izrazu 6.2, temperatura iznosi 60,3 °C. U samom eksperimentalnom istraživanju to je bio trenutak koji označava prestanak rada kotrljajnog ležaja, odnosno trenutak kad je nastupio otkaz (zaribavanje).

Prediktivno vrijeme možemo jednostavno izraziti:

$$t_{pred} = t - 21 \text{ (min)} \quad (6.7)$$

### 6.11.2.1 Analiza predviđanja temperature kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem unutarnjeg prstena u ovisnosti o temperaturnim razredima

Ako se u izraz 6.6 uvrste vrijednosti temperature pojedinog temperaturnog razreda, dobiva se vrijeme kada se postiže temperatura paljenja plinova i para koji pripadaju tom temperaturnom razredu. Tako npr. kotrljajni kuglični ležaj dostiže temperaturu temperaturnog razreda T3=200 °C prema izrazu 6.6 u prediktivnom vremenu od 5,21 min (tablica 6.28).



**Slika 6.42** Model predviđanja vremena dostizanja temperatura pojedinih temperaturnih razreda kod kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem unutarnjeg prstena

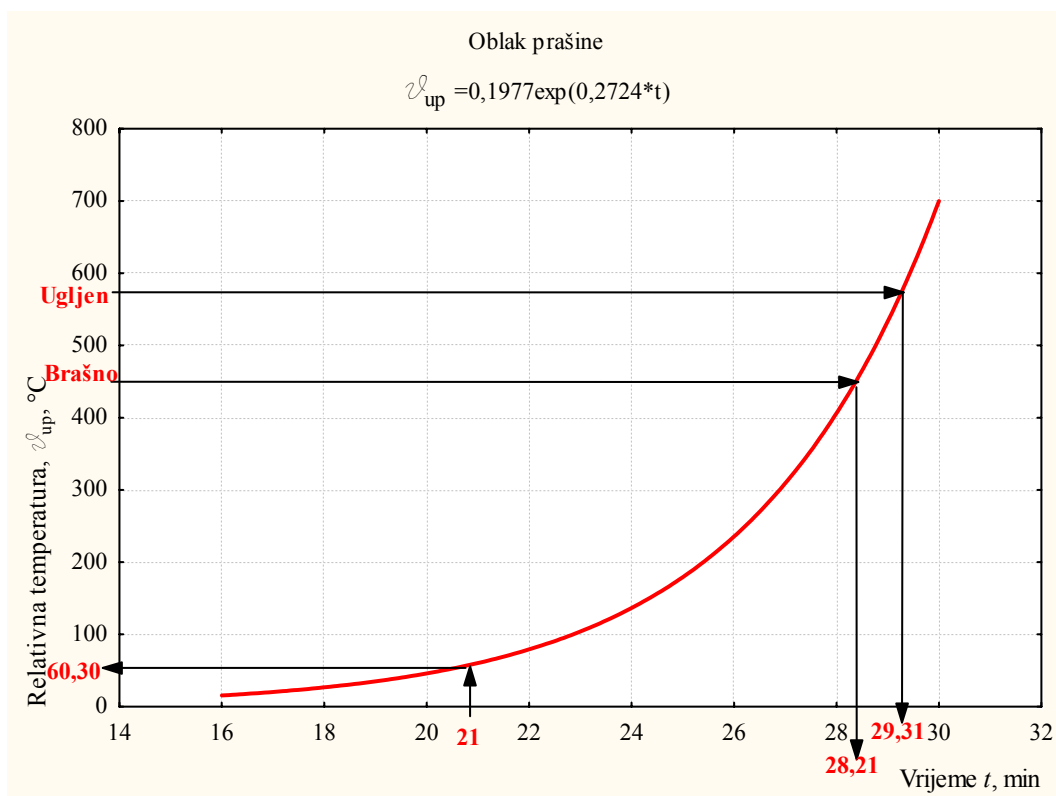
Sliku 6.42 može se prikazati i u obliku tablice gdje su prikazana pojedina vremena dostizanja temperatura temperaturnih razreda. Prema dobivenom izrazu 6.6, vrijednost temperaturnog razreda T1=450 °C dostiže se za 7,38 min. U praksi, za rotacijsku električnu i strojnu opremu u eksplozivnoj atmosferi postrojenja dostizanje temperaturnog razreda T1=450 °C znači paljenje svih plinova i para.

**Tablica 6.28** Vrijeme dostizanja temperature pojedinih temperaturnih razreda kod kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem unutarnjeg prstena

	Temperaturni razred					
	T6	T5	T4	T3	T2	T1
	85 °C	100 °C	135 °C	200 °C	300 °C	450 °C
Vrijeme $t$ (min)	22,26	22,86	23,96	25,41	26,89	28,38
Prediktivno vrijeme $t_{pred}$ (min) (proteklo nakon trenutaka zaribavanja)	1,26	1,86	2,96	4,41	5,89	7,38

### 6.11.2.2 Analiza predviđanja temperature kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem unutarnjeg prstena u ovisnosti o temperaturi paljenja oblaka prašine

Ako se u izraz 6.6 uvrste vrijednosti temperature paljenja oblaka zapaljivih prašina, dobiva se vrijeme kad se postiže temperatura paljenja oblaka zapaljive prašine (slika 6.43). Tako da npr. kotrljajni kuglični ležaj dostiže temperaturu paljenja oblaka prašine pšeničnog brašna od 430 °C u vremenu od 7,21 min, a temperaturu paljenja oblaka ugljene prašine od 580 °C u vremenu od 8,31 min (tablica 6.29).



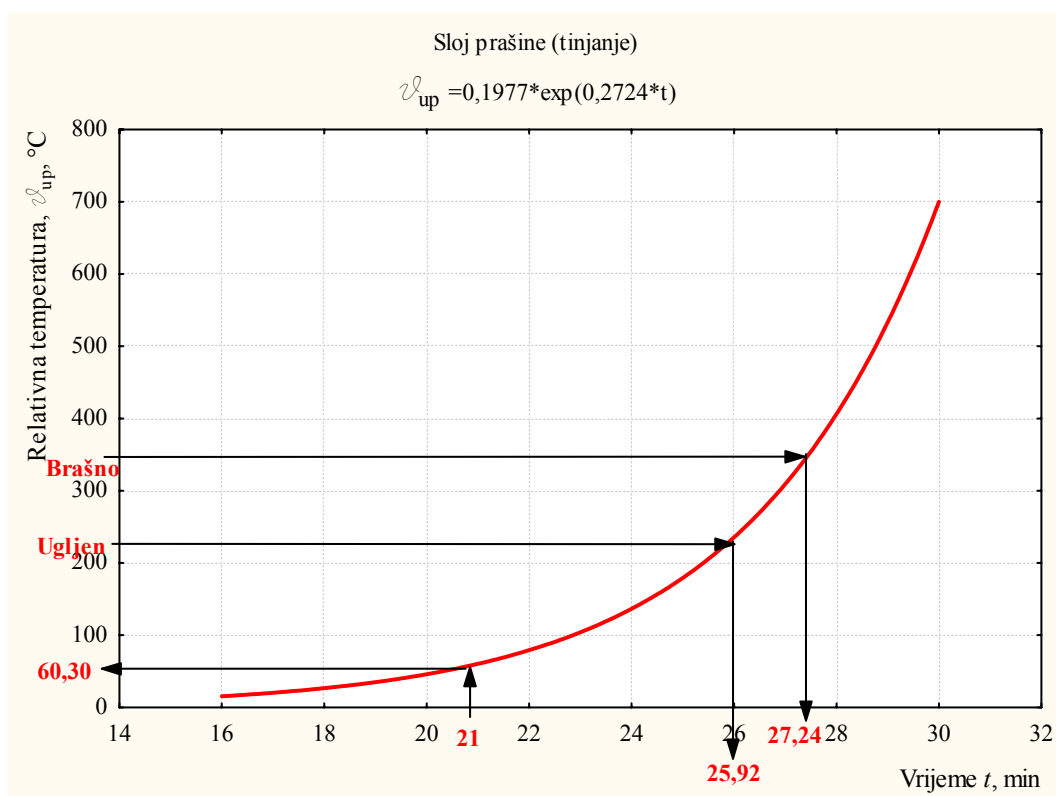
**Slika 6.43** Model predviđanja vremena dostizanja temperatura paljenja oblaka zapaljive prašine kod kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem unutarnjeg prstena

**Tablica 6.29** Vrijeme dostizanja temperature paljenja oblaka zapaljive prašine kod kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem unutarnjeg prstena

	Zapaljiva prašina	
	Brašno 430 °C	Ugljen 580 °C
Vrijeme (min)	28,21	29,31
Prediktivno vrijeme (min) (proteklo nakon trenutaka zaribavanja)	7,21	8,31

### 6.11.2.3 Analiza predviđanja temperature kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem unutarnjeg prstena u ovisnosti o temperaturi paljenja sloja prašine

Ako se u izraz 6.6 uvrste vrijednosti temperature paljenja sloja zapaljive prašine, dobiva se vrijeme kad se postiže temperatura paljenja sloja zapaljive prašine (slika 6.44). Tako da npr. kotrljajni kuglični ležajevi dostižu temperaturu paljenja sloja ugljene prašine od 230 °C u vremenu od 4,92 min, a temperaturu paljenja sloja prašine pšeničnog brašna od 350 °C u vremenu od 6,24 min (tablica 6.30).



**Slika 6.44** Model predviđanja vremena dostizanja temperatura paljenja sloja zapaljive prašine kod kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem unutarnjeg prstena

**Tablica 6.30** Vrijeme dostizanja temperature paljenja sloja zapaljive prašine kod kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem unutarnjeg prstena

	Zapaljiva prašina	
	Brašno	Ugljen
	230 °C	350 °C
Vrijeme (min)	25,92	27,24
Prediktivno vrijeme (min) (protoklo nakon trenutaka zaribavanja)	4,92	6,24

### 6.11.3 Analiza predviđanja temperature kotrljajnih kugličnih ležajeva s oštećenjem kaveza

Ispitnim sustavom dobivene su temperature otkaza (zaribavanja)  $\mathcal{G}_z$  kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem kaveza prikazane na histogramu (slika 6.26).

Regresijskom analizom vrijednosti temperatura zagrijavanja kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem kaveza dobivena je eksponencijalna jednadžba prema izrazu 6.3.

Zapravo, izraz 6.3 opisuje porast temperature u ovisnosti o vremenu u razdoblju otkaza (zaribavanja) kotrljajnog kugličnog ležaja. Kako bi se izrazilo vrijeme dosezanja pojedinih temperatura (temperaturnih razreda, tj. temperature paljenja plinova, para i prašina), potrebno je iz izraza 6.3 vrijeme izraziti kao:

$$t = 3,1966 \cdot \ln \frac{\mathcal{G}}{0,077632} \text{ (min)} \quad (6.8)$$

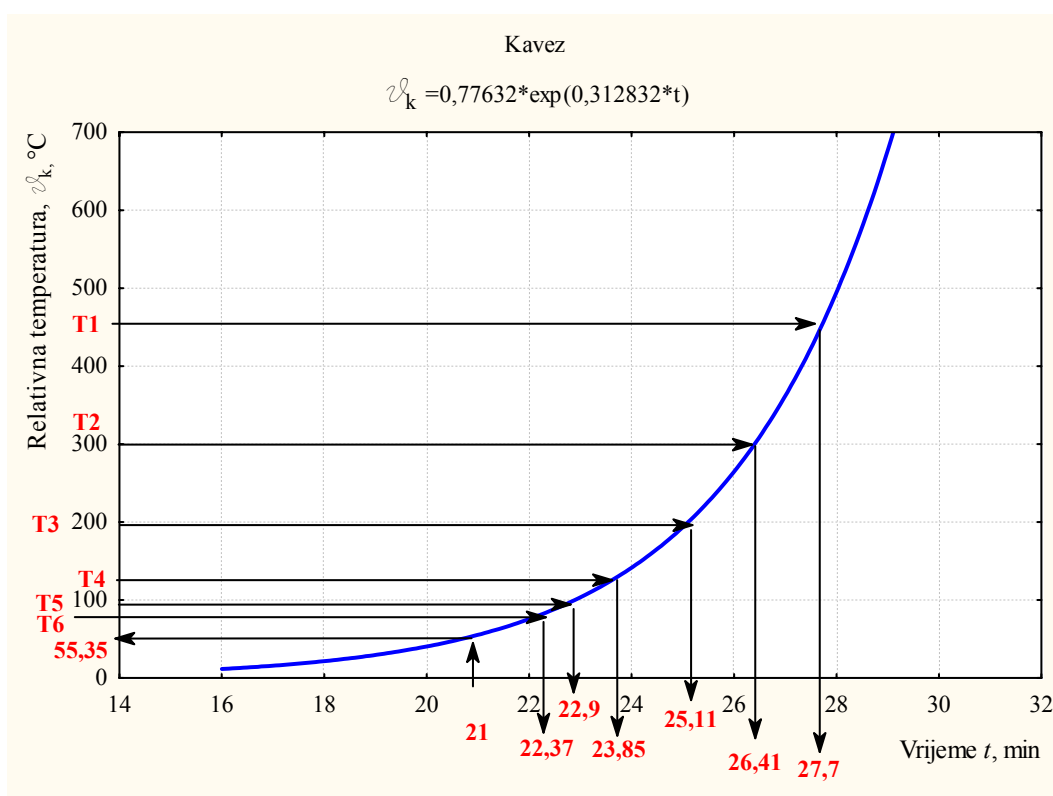
Vrijeme  $t=21$  min zapravo označava trenutak nakon kojeg se provodi predikcija. Granice kritično visoke temperature određene prema temperaturnim razredima prikazane su na slici 6.31. U vremenu prestanka rada kotrljajnog kugličnog ležaja prema izrazu 6.3, temperatura iznosi 55,35 °C. U samome eksperimentalnom istraživanju to je bio trenutak koji označava prestanak rada kotrljajnog ležaja, odnosno trenutak kad je nastupio otkaz (zaribavanje).

Prediktivno vrijeme možemo jednostavno izraziti:

$$t_{pred} = t - 21 \text{ (min)} \quad (6.9)$$

### 6.11.3.1 Analiza predviđanja temperature kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem kaveza u ovisnosti o temperaturnim razredima

Ako se u izraz 6.8 uvrste vrijednosti temperature pojedinog temperaturnog razreda, dobiva se vrijeme kad se postiže temperatura paljenja plinova i para koji pripadaju tom temperaturnom razredu. Tako npr. kotrljajni kuglični ležaj dostiže temperaturu temperaturnog razreda T3 =200 °C prema izrazu 6.8 u prediktivnom vremenu od 4,11 min (tablica 6.31).



**Slika 6.45** Model predviđanja vremena dostizanja temperatura pojedinih temperaturnih razreda kod kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem kaveza

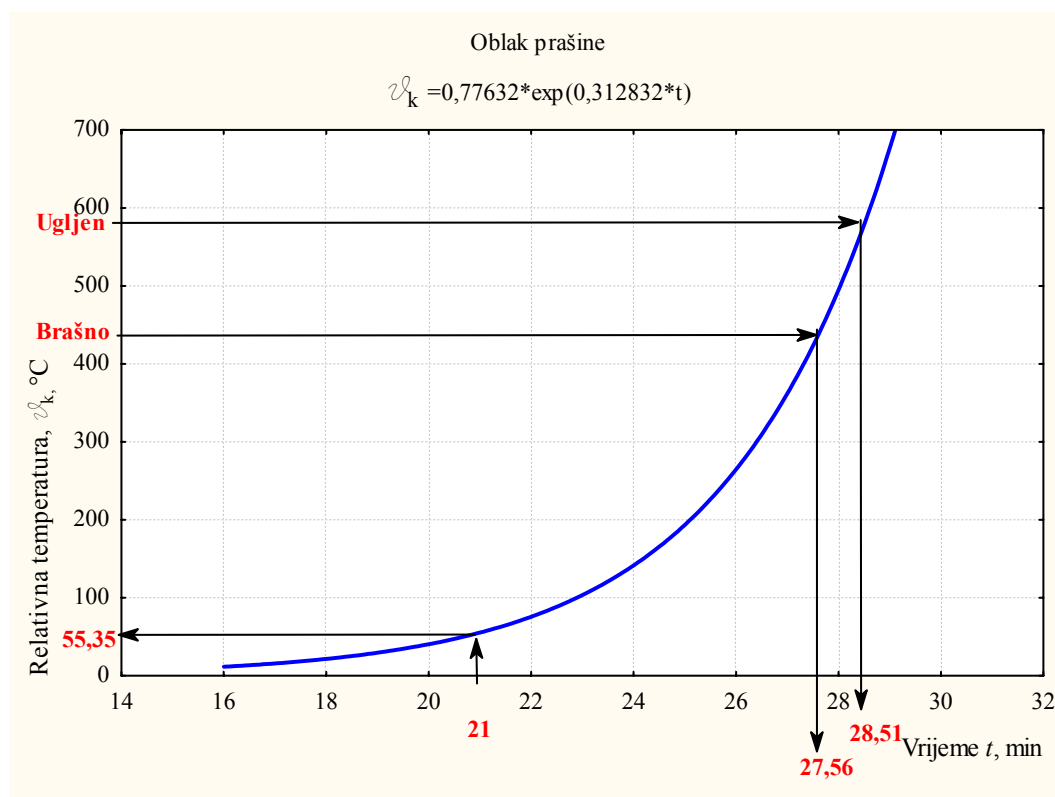
Sliku 6.45 može se prikazati i u obliku tablice gdje su prikazana pojedina vremena dostizanja temperatura temperaturnih razreda. Prema dobivenom izrazu 6.8, vrijednost temperaturnog razreda T1=450 °C dostiže se za 6,7 min. U praksi, za rotacijsku električnu i strojnu opremu u eksplozivnoj atmosferi industrijskih postrojenja dostizanje temperaturnog razreda T1=450 °C znači paljenje svih plinova i para.

**Tablica 6.31** Vrijeme dostizanja temperature pojedinih temperaturnih razreda kod ležaja s oštećenjem kaveza

	Temperaturni razred					
	T6	T5	T4	T3	T2	T1
	85 °C	100 °C	135 °C	200 °C	300 °C	450 °C
Vrijeme $t$ (min)	22,37	22,9	23,85	25,11	26,41	27,2
Prediktivno vrijeme $t_{pred}$ (min) (proteklo nakon trenutaka zaribavanja)	1,37	1,9	2,85	4,11	5,41	6,7

### 6.11.3.2 Analiza predviđanja kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem kaveza u ovisnosti o temperaturi paljenja oblaka prašine

Ako se u izraz 6.8 uvrste vrijednosti temperature paljenja oblaka zapaljive prašine, dobiva se vrijeme kad se postiže temperatura paljenja oblaka zapaljive prašine (slika 6.46). Tako da npr. kotrljajni kuglični ležaj dostiže temperaturu paljenja oblaka prašine pšeničnog brašna od 430 °C u vremenu od 6,56 min, a temperaturu paljenja oblaka ugljene prašine od 580 °C u vremenu od 7,51 min (tablica 6.32).



**Slika 6.46** Model predviđanja vremena dostizanja temperatura paljenja oblaka zapaljive prašine kod kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem kaveza

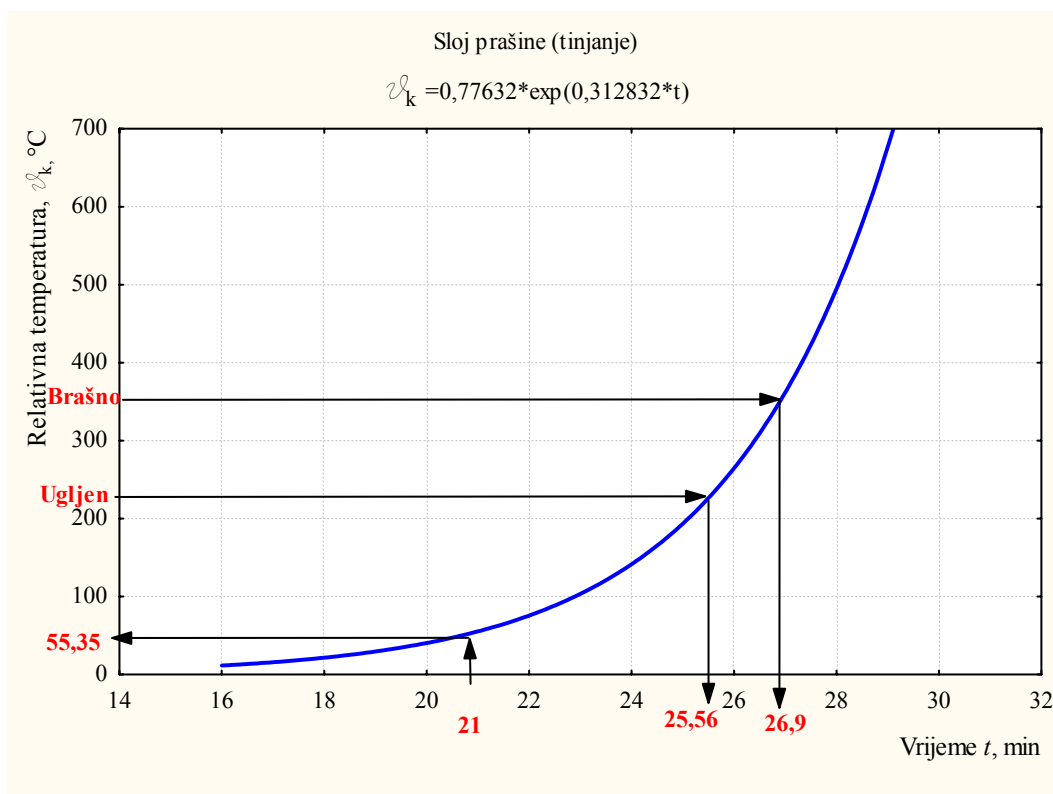


**Tablica 6.32** Vrijeme dostizanja temperature paljenja oblaka zapaljive prašine kod kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem kaveza

	Zapaljiva prašina	
	Brašno	Ugljen
	430 °C	580 °C
Vrijeme (min)	27,56	28,51
Prediktivno vrijeme (min) (protoklo nakon trenutaka zaribavanja)	6,56	7,51

### 6.11.3.3 Analiza predviđanja temperature kotrljajnog kugličnog ležaja u ovisnosti o temperaturi paljenja sloja prašine

Ako se u izraz 6.8 uvrste vrijednosti temperature paljenja sloja zapaljive prašine, dobiva se vrijeme kad se postiže temperatura paljenja sloja zapaljive prašine (slika 6.47). Tako da npr. kotrljajni kuglični ležaj dostiže temperaturu paljenja sloja ugljene prašine od 230 °C u vremenu od 4,56 min, a temperaturu paljenja sloja prašine pšeničnog brašna od 350 °C u vremenu od 5,9 min (tablica 6.33).



**Slika 6.47** Model predviđanja vremena dostizanja temperatura paljenja sloja zapaljive prašine kod kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem kaveza

**Tablica 6.33** Vrijeme dostizanja temperature paljenja sloja zapaljive prašine kod kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem kaveza

	Zapaljiva prašina	
	Brašno	Ugljen
	230 °C	350 °C
Vrijeme (min)	25,56	26,9
Prediktivno vrijeme (min) (protoklo nakon trenutaka zaribavanja)	4,56	5,9

### 6.12 Usporedba prediktivnih vremena dostizanja temperaturnih razreda s vremenima početka i vremenom otkaza kotrljajnih kugličnih ležajeva s različitim mjestima oštećenja

Usporedbom prediktivnih vremena  $t_{pred}$  kod kotrljajnih kugličnih ležajeva s različitim mjestima oštećenjima, vidljivo je da se temperature temperaturnih razreda T6 i T5 dosegnu najbrže kod oštećenja unutarnjeg prstena: za 1,26 min, odnosno za 1,86 min. Temperature svih ostalih temperaturnih razreda najbrže se dosegnu kod kotrljajnih kugličnih ležajeva s oštećenjem kaveza (tablica 6.34). No ukoliko se dobivena prediktivna vremena  $t_{pred}$  dostizanja temperature temperaturnih razreda usporede s dobivenim vremenima početka otkaza  $t_{po}$  i vremenima otkaza (zaribavanja)  $t_z$  kod ispitivanih ležajeva, vidljivo je da se početni znakovi otkaza, kao i sam otkaz, pojavljuju značajno prije ( $t_{po}=79$  min i  $t_z=96$  min) kod kotrljajnih kugličnih ležajeva s oštećenjem unutarnjeg prstena nego kod ostalih oštećenja (tablica 6.34).

**Tablica 6.34** Prediktivno vrijeme  $t_{pred}$  dostizanja temperature temperaturnih razreda u kotrljajnim kugličnim ležajevima s različitim oštećenjima

Tip oštećenja	Prediktivno vrijeme $t_{pred}$ , min	Temperaturni razred						Vrijeme početka otkaza $t_{po}$ , min	Vrijeme otkaza (zaribavanja) $t_z$ , min
		T6	T5	T4	T3	T2	T1		
		85 °C	100 °C	135 °C	200 °C	300 °C	450 °C		
Vanjski prsten	Vanjski prsten	2,02	2,63	3,75	4,21	6,72	8,23	169	208
	Unutarnji prsten	1,26	1,86	2,96	4,41	5,89	7,38	79	96
	Kavez	1,37	1,9	2,85	4,11	5,41	6,7	108	130

Usporedbom prediktivnih vremena  $t_{pred}$  kod kotrljajnih kugličnih ležajeva s različitim mjestima oštećenja, vidljivo je da se dostizanje temperature paljenja oblaka zapaljive prašine za brašno i ugljen pojavljuje za 6,56 min, odnosno za 7,51 min, najbrže kod oštećenja kaveza (tablica 6.35). Nadalje, usporedbom prediktivnih vremena  $t_{pred}$  kod kotrljajnih kugličnih ležajeva s različitim oštećenjima, vidljivo je da se dostizanje temperature paljenja sloja zapaljive prašine za brašno i ugljen pojavljuje za 4,56 min odnosno za 5,9 min, najbrže kod oštećenja kaveza (tablica 6.34).

**Tablica 6.35** Prediktivno vrijeme  $t_{pred}$  dostizanja temperature paljenja oblaka zapaljive prašine, vrijeme početka otkaza  $t_{po}$  i vrijeme otkaza (zaribavanja)  $t_z$

Prediktivno vrijeme $t_{pred}$ , min		Zapaljiva prašina (oblak)		Vrijeme početka otkaza $t_{po}$ , min	Vrijeme otkaza (zaribavanja) $t_z$ , min
		Brašno	Ugljen		
		430 °C	580 °C		
Tip oštećenja	Vanjski prsten	8,06	9,18	169	208
	Unutarnji prsten	7,21	8,31	79	96
	Kavez	6,56	7,51	108	130

**Tablica 6.36** Prediktivno vrijeme  $t_{pred}$  dostizanja temperature paljenja sloja zapaljive prašine, vrijeme početka otkaza  $t_{po}$  i vrijeme otkaza (zaribavanja)  $t_z$

Prediktivno vrijeme $t_{pred}$ , min		Zapaljiva prašina (sloj)		Vrijeme početka otkaza $t_{po}$ , min	Vrijeme otkaza (zaribavanja) $t_z$ , min
		Brašno	Ugljen		
		230 °C	350 °C		
Tip oštećenja	Vanjski prsten	5,73	7,3	169	208
	Unutarnji prsten	4,92	6,24	79	96
	Kavez	4,56	5,9	108	130

No ukoliko se dobivena prediktivna vremena  $t_{pred}$  dostizanja temperature paljenja oblaka i sloja zapaljivih prašina, ugljena i brašna usporede s dobivenim vremenima početka otkaza  $t_{po}$

i vremenima otkaza (zaribavanja)  $t_z$  kod ispitivanih ležajeva, vidljivo je da se početni znakovi otkaza, kao i sam otkaz, pojavljuju značajno prije ( $t_{po}=79$  min i  $t_z=96$  min) kod kotrljajnih kugličnih ležajeva s oštećenjem unutarnjeg prstena nego kod ostalih oštećenja (tablica 6.34).

## **7. PRIJEDLOG ZAŠTITNOG SUSTAVA KOTRLJAJNOG KUGLIČNOG LEŽAJA U EKSPLOZIVNOJ ATMOSFERI**

Metoda nadzora uzročnika paljenja u kotrljajnim kugličnim ležajevima ugrađenim u rotacijsku električnu i strojnu opremu vrlo se slabo primjenjuje u industrijskim postrojenjima s eksplozivnom atmosferom, osobito kod „male” opreme [101]. Današnji nadzor uzročnika paljenja u rotacijskoj opremi koja se nalazi u eksplozivnoj atmosferi svodi se isključivo na kapitalnu opremu, a i to samo pojedinačno. Kod električnih rotacijskih strojeva nadzor je primijenjen jedino u vrsti protueksplozijske zaštite „povećana sigurnost” i to tako da se temperaturna osjetila ugrađuju u namot statora elektromotora.

Za idejno rješenje nadzora temperature kod kotrljajnih kugličnih ležajeva kao uzročnika paljenja eksplozivne atmosfere treba svakako uvažiti svjetska iskustva, znanstvenu literaturu, specifičnosti gospodarstva i okruženja te provedeno istraživanje i analizu. Kako se gospodarstvo Republike Hrvatske temelji na malim i srednjim industrijskim organizacijama (postrojenjima) koje pokušavaju pronaći svoje mjesto na globalnome tržištu, predložena metodologija nadzora uzročnika paljenja kotrljajnih kugličnih ležajeva trebala bi im u tome pomoći, prvenstveno kako se financijski troškovi ne bi povećavali. Zapravo, osjetila, procesori i komunikacijske komponente postaju sve manje, jeftinije i više komercijalizirane pa se na taj način postiže njihova osnovna prednost u nepovisivanju financijskih troškova.

Uvođenje suvremenog nadzora usko je povezano s povećanjem razine sigurnosti oprema, a s time i samog postrojenja. Zapravo, dva se trenda uzajamno potiču: pojava naprednih sustava nadzora omogućava povisivanje razine sigurnosti, a želja za povišenjem razine sigurnosti zahtijeva uvođenje viših stupnjeva nadzora. Druge važne karakteristike suvremenih sustava nadzora jesu povećana funkcionalnost, pouzdanost, ekonomičnost te sigurnost koju one donose. Predloženi sustav nadzora kotrljajnih kugličnih ležajeva kao uzročnika paljenja eksplozivne atmosfere u praktičnoj primjeni trebao bi svakako koristiti komercijalno razvijene i serijski proizvedene elektroničke komponente. Time se, naravno, ostvaruje bitno niža cijena razvoja i ugradnje, kao i kasnijeg održavanja toga sustava.

Nadzor može biti lokalni, s pulta (sučelja) u neposrednom susjedstvu nadziranog uređaja ili daljinski, s dalekog pulta (sučelja) u prostoriji izvan ugroženog prostora. Daljinski nadzori često su centralizirani i provode se sa zajedničkih mjesta smještenih u kontrolnim sobama, odakle se može pristupiti svim uređajima koji ulaze u promatrani podsustav ili postrojenje. Djelovanje zaštitnog sustava može biti ručno, kada sustav nadzora izravno prosljeđuje

upravljačke signale s operatorskih tipaka na pripadne aktuatorne, ili automatsko, kada aktuatorima upravlja procesna jedinica sustava obavljajući niz programiranih operacija.

Između te dvije krajnosti postoji mogućnost poluautomatskog upravljanja te ručnog upravljanja uz automatsko kondicioniranje upravljačkog signala ili njegovo raspoređivanje na više aktuatora. Automatsko upravljanje zaštitnog sustava može biti pokrenuto ručno, na zahtjev operatera, ili automatski, npr. kao rezultat djelovanja zaštitne funkcije. Mod automatskog upravljanja može potom pokrивati izvođenje nekog zadatka, npr. upućivanje na prekid rada elektromotora, pumpe, ventilatora ili može samo signalizirati operateru određenu signalnu (alarmnu) radnju, npr. pomoću prorade signalnih svjetala, zvučnih signala i sl. Ukoliko se koriste automatske radnje, potrebno je osigurati da njihovo trajanje bude neograničeno dugo, odnosno sve dok ih operater ne isključi, ili dok se ne otkloni uzrok pokretanja.

### **7.1 Zahtjevi na sustav za nadzor uzročnika paljenja**

Zahtjevi koje sustav koji se namjerava ugraditi u rotacijsku opremu u prostoru s eksplozivnom atmosferom treba posjedovati (tj. tražena ili poželjna svojstva koja takvi sustavi moraju imati), trebali bi biti svakako sljedeći:

- funkcionalnost – sklop mora moći obavljati sve očekivane funkcije nadzora i upravljanja.
- jednostavnost uporabe – uključuje prije svega preglednost, intuitivnost i jednostavnost komunikacije s operaterom. Traži se jasan, izravan prikaz potrebne informacije te jednostavno, brzo i sigurno pokretanje upravljačkih operacija. Centralizirani, daljinski nadzor i upravljanje mogu bitno pridonijeti jednostavnoj uporabi sustava. Viši stupanj automatizacije (automatizirane operacije, dijagnostika i automatski nadzor ispravnosti rada sustava, zaštitne funkcije) omogućava ne samo jednostavniji rad, nego i manji broj operatera i njihovu bržu obuku. Standardizacija korisničkih sučelja svakako olakšava obuku operatera. U razvoju osjetila treba uzeti u obzir zahtjeve iz normativnih dokumenata [122-126] i dosadašnja praktična iskustva [127-136].
- prihvatljivo niska cijena – pod cijenom sustava mogu se promatrati četiri komponente: cijena nabavke, cijena instalacije i puštanja u rad, očekivani troškovi redovnog rada te očekivani troškovi održavanja. U analizu cijene novog sustava nadzora i upravljanja uključuju se i očekivane uštede zbog manjeg broja potrebnih operatera, ekonomičnijeg rada upravljanog uređaja ili povećane pouzdanosti. Jedan od najvažnijih doprinosa niskoj cijeni sustava jest uporaba već postojećih provjerenih i pouzdanih komponenti, serijski

proizvedenih za komercijalno tržište (eng. *commercial off-the-shelf*), gdje god je to moguće.

- kompaktnost – traži se što je moguće manja masa i obujam uređaja. Naravno, minijaturizacija ne smije dovesti u pitanje jednostavnost pristupa, uporabi i održavanja.
- robusnost i otpornost – sustav nadzora i upravljanja mora biti otporan na nepovoljne utjecaje okoliša, kao što su prašina, povišena temperatura okoliša, vlaga, prskanje vodom, slana magla (to se osobito odnosi na pomorske objekte npr. plinske platforme), udari, vibracije, elektromagnetske smetnje, smetnje u izvorima napajanja (lutajuće struje) i drugo. Robusnost obuhvaća i različite zaštitne mehanizme, koji u slučaju kvara sprečavaju nastanak teže havarije, kao i otpornost na greške operatera – zaštitu od neželjenog ili nedozvoljenog pokretanja osjetljivijih operacija.
- pouzdanost sustava – traži se što je moguće kraće vrijeme kroz životni vijek sustava tijekom kojeg će sustav biti izvan funkcije zbog kvarova. Broj kvarova može se smanjiti kvalitetom projektiranja, izrade, integracije i instalacije sustava. Redovito preventivno održavanje također smanjuje učestalost pojave kvara. Redundantnost izvedbe kritičnih komponenti omogućava normalan rad sustava u slučaju kvara redundantne komponente. Automatska dijagnostika i samo–dijagnostika smanjuju potrebnu učestalost preventivnog održavanja, ubrzavaju detekciju i lokalizaciju nastalog kvara, a mogu i spriječiti njegovo nastajanje ranom detekcijom kvara u razvoju. Također pouzdanost označava i da osjetilo posjeduje određeni IPL sukladno HRN EN 1346-6, odnosno SIL prema IEC 61508 [122] i IEC 61511 [123].
- dostupnost servisa i jednostavnost održavanja – kvaliteta sustava i mali broj očekivanih kvarova jedan su od najvažnijih uvjeta potrebnih za jednostavnost održavanja. Standardizacija i modularnost izvedbe pridonose jednostavnosti održavanja, a smanjuju i potrebnu količinu pričuvnih dijelova. Dostupnost i brzina servisa od velike su važnosti za sve sustave zbog moguće golemih troškova prouzročenih onesposobljenošću postrojenja ili prisilnim čekanjem na popravak.
- jednostavnost nadogradnje i povezivanja s drugim sustavima nadzora i upravljanja – kako bi se omogućile naknadne intervencije u već postojeći sustav nadzora i upravljanja u svrhu njegove dopune ili poboljšanja, važno je postići njegovu modularnost i fleksibilnost, i to na hardverskoj i na softverskoj razini. Ako su potrebne veće izmjene, a postojeći je sustav nadzora i upravljanja već zastario, obično se više isplati instalirati novi sustav nego nadograđivati stari. Za olakšano povezivanje s drugim sustavima, potreban je što je moguće viši stupanj standardizacije hardverskih i softverskih komunikacijskih

sučelja. Osim toga, za oba ova zahtjeva traži se odgovarajuća kvaliteta i potpunost projektne i izvedbene dokumentacije, kao i njezina dostupnost.

## 7.2 Sklop s osjetilom kao dio sustava nadzora

Temeljna uloga nadzornih sklopova s osjetilom koji bi se ugrađivali u rotacijsku opremu smještenu u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom bila bi sprečavanje pojave uzročnika paljenja. U tome cilju, ugrađivanjem sklopova s osjetilom za nadzor temperature kotrljajnih ležajeva dobila bi se potpuna informacija o njihovu stanju, sa stajališta protueksplozijske zaštite ali i funkcionalnosti i raspoloživosti. Dobiveni kvalitativni i/ili kvantitativni podaci kontinuirano bi pratili stanje procesnog kotrljajnog kugličnog ležaja te bi omogućili prognoziranje njegova stanja. Nadzor kotrljajnih kugličnih ležajeva može se provoditi sustavima gdje se pod time podrazumijevaju elektronički sklopova s osjetilom (slika 7.1). Može se reći da danas ne postoje nadzorni sustavi koji barem u jednom svojem segmentu ne koriste mikroprocesore. U centraliziranim sustavima svi su pojedinačni nadzorni sustavi povezani sa sučeljem centralnog računala pa on provodi cjelokupnu digitalnu obradu signala. Često je potrebno da svi podaci sa svih sklopova s osjetilima koji su ugrađeni na opremi u ugroženom prostoru budu dostupni na jednom mjestu, no njihovo se prikupljanje može organizirati i kao hijerarhijski proces.



**Slika 7.1** Komponente sklopa s osjetilom

Komponente jednog sklopa s osjetilom temeljno se sastoji od:

- a) osjetilo koja prikuplja podatke (temperatura),
- b) procesne jedinice koja kontrolira rad osjetila i primopredajnika (komunikacijskih jedinica) te implementira mrežne protokole,
- c) komunikacijske jedinice (radio-primopredajna jedinica) koja predaje svoje prikupljene podatke,



- d) jedinica za napajanje energijom,
- e) softvera – programa koji definira unaprijed određene postupke za prikupljanje, analizu i prosljeđivanje podataka.

Pogodno je sustave sklopova s osjetilima podijeliti prema prostornom rasporedu rotacijske opreme u postrojenju i ostvariti manje podsustave koji bi djelomice nezavisno provodili nadzor nad užim prostorom te, prema potrebi, kontrolu procesa. Ako je broj sustava sklopova s osjetilima velik pa postoje i drugi podsustavi, oni se međusobno mogu povezati preko računala više razine, sve do sprezanja računala koja su u nadzoru s onim koji je zadužen za globalni prikaz, planiranje i analizu čitavog postrojenja.

### 7.3 Načini nadzora kotrljajnih kugličnih ležajeva

Kontrola rada kotrljajnih kugličnih ležajeva u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom može se provoditi konvencionalnim i naprednijim sustavima. Konvencionalni sustav podrazumijeva žičanu vezu, a napredni bežičnu vezu sklopa s osjetilom i sustava nadzora.

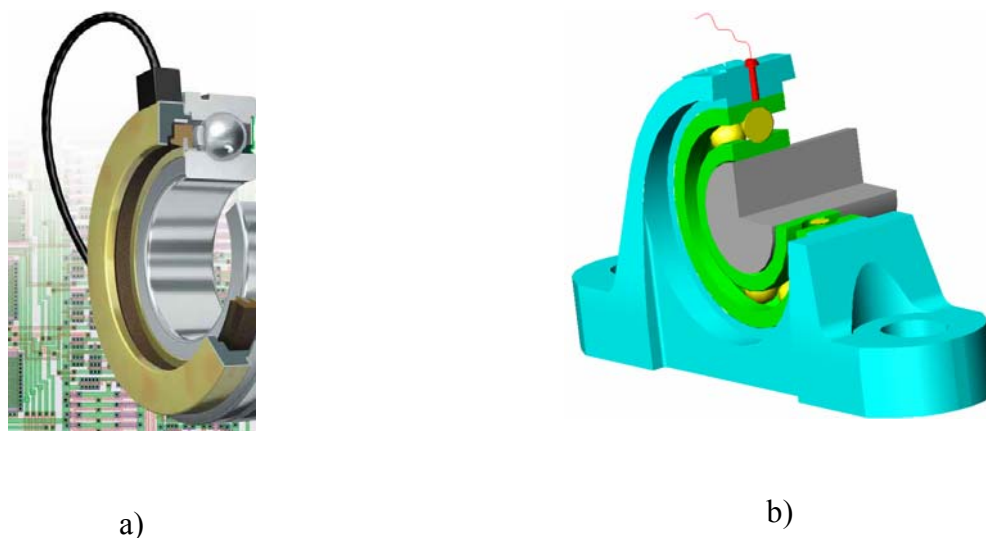
#### 7.3.1 Komunikacijska veza pomoću žičane instalacije između sklopa s osjetilom i nadzornog sustava



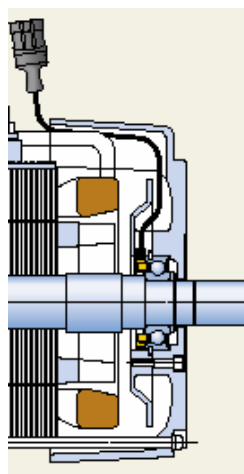
**Slika 7.2** Shematski prikaz nadzora temperature kotrljajnih kugličnih ležajeva pomoću žičane veze koja povezuje sklop s osjetilom u opremi i sustav nadzora

Ukoliko se u današnjim postrojenjima s eksplozivnom atmosferom u kojima je ugrađena kapitalna strojna i električna rotacijska oprema koristi neki od sklopova s osjetilom, u tom je

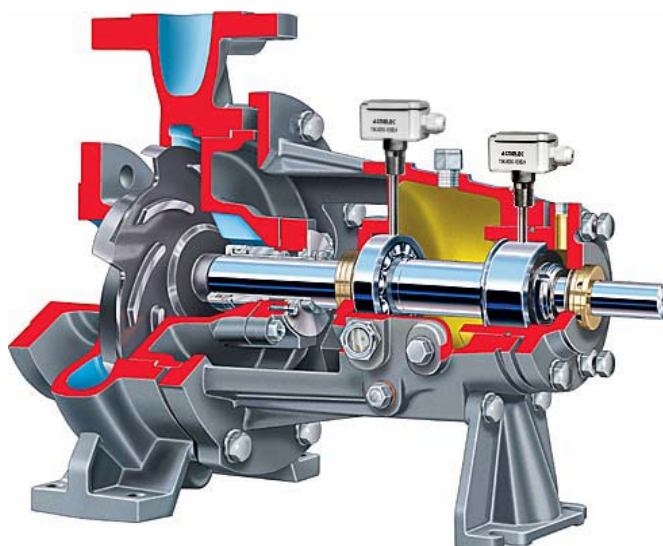
slučaju upotrijebljen isključivo konvencionalni sustav (slika 7.2). Bežični sustavi nadzora u današnjim industrijskim postrojenjima u kojima se pojavljuje eksplozivna atmosfera u potpunosti su izostavljeni. Žičana veza konvencionalnog sustava povezuje sklop s osjetilom za nadzor temperature koji je ugrađen u kotrljajni kuglični ležaj u opremi s nadzornim i upravljačkim sustavom (slika 7.3).



**Slika 7.3** a) Sklop s osjetilom sa žičanom vezom [137] b) temperaturno osjetilo (sa žicom) ugrađen u ležajni sklop



**Slika 7.4** Presjek ležajnog sklopa elektromotora s prikazom ugradnje temperaturnog osjetila koji posjeduje žičanu vezu i priključak („konektor”) [137]



**Slika 7.5** Sklopovi s osjetilima nadzora temperature kotrljajnog kugličnog ležaja ugrađeni u strojnoj rotacijskoj opremi (crpki)

Primjenom konvencionalnog sustava nadzora kotrljajnog kugličnog ležaja zbog posjedovanja žičane instalacije između sklopa s osjetilom i nadzorne (upravljačke) jedinice u ugroženom prostoru, pojavljuje se veliki broj novih zahtjeva na električnu instalaciju koji trebaju biti ispunjeni. Zapravo bi sve električne instalacije, pa tako i veza sklopa s osjetilom i sustava nadzora, trebale ispuniti zahtjeve norme HRN EN 60079-14 [138].

U nadzornom sustavu rotacijske opreme u zonama opasnosti osjetila ne djeluju samostalno, već su, općenito gledajući, dio cjelokupnog sustava koji sadrži komunikacijsku vezu od predajnika i prijemnika, različite analogne i digitalne dijelove za obradu signala i sustav upravljanja.

### **7.3.2 Bežična komunikacijska veza između sklopa s osjetilom i nadzornog sustava**

Bežične mreže sklopova s osjetilima s spajaju mikrosenzorsku tehnologiju, obradu signala malih snaga računanja i bežične mreže malih cijena u jedan mali sustav. On osigurava distribuiranu mrežu i internetski (mrežni) pristup osjetilima i kontrolnim osjetilima smještenim duboko u opremi u industrijskom postrojenju. Sklopovi s osjetilima razmješteni su u određenom ugroženom prostoru industrijskog postrojenja i posjeduju mogućnost RF-komunikacije signalnih procesa. To omogućava stotinama sklopova s osjetilom da međusobno surađuju u mreži radi ostvarivanja zadataka nadzora.

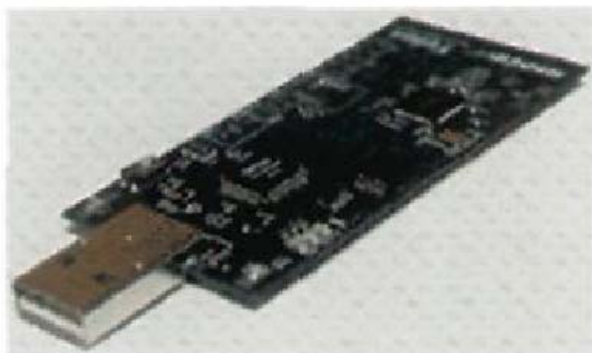
Bežična mreža sklopova s osjetilima razlikuje se od konvencionalne. Mala veličina sklopa s osjetilom ograničava kapacitet baterije potrebne kako bi se svaka operacija djelotvorno obavila. Ona također ograničava i opseg radio prijenosa i sugerira malu *multi-hop* prijenosnu strukturu. Rotacijska oprema može raditi dulje vrijeme bez pojave uzročnika paljenja u kotrljajnim kugličnim ležajevima. U tom će slučaju i bežična mreža sklopova s osjetilima ostati uglavnom neaktivni dugo vremena, a zatim će postati aktivni ukoliko se nešto detektira ili se pojavi neka alarmna vrijednost. Takav način rada može biti programiran u samom sklopu s osjetilom.



a) WeC



b) Mica



c) Telos



d) Spec protot

**Slika 7.6** Sklopovi s osjetilima sa Sveučilišta Kalifornije u Berkeleyu

Današnji je razvoj osjetila toliko napredovao da već postoji i niz komercijalnih osjetila malih dimenzija s mogućnošću primjene, kao sklopa s osjetilom u kotrljajnom kugličnom ležaju. Jedan od najnaprednijih sklopa s osjetilom razvijen je na Sveučilištu Kalifornije (UC Berkeley) 1999. godine, u proizvodnoj familiji pod imenom „WeC”. „WeC” sadrži mali 8-

bitni Atmel mikrokontroler (512 bitni RAM i 8 kB *flash* memoriju) koji koristi 15 mW aktivne energije, a 45  $\mu$ W u „spavajućem” modu. „WeC” ima također i jednostavan radio koji podržava brzinu prijenosa do 10 Kbps s 36 mW energijom prijenosa i 9 mW s prijemnom energijom.

Nadalje, 2001. godine prikazana je familija proizvoda „Mica”. Mica ima 8-bitni 4 MHz mikrokontroler (ATmegal03L). Mica je projektiran sa 4 KB Ram i 128 KB *flash* memorije. „Mica” posjeduje radio sa sličnim karakteristikama kao i „WeC”. Zadnji u familiji, „Telos”, prikazan je 2004. godine. „Telos” ima sljedećih niz novih mogućnosti:

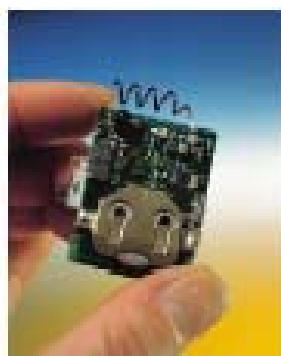
- 1) mikrokontroler od „Texas Instrumentsa” sa 3 mW aktivnom energijom i 15  $\mu$ W u spavajućem modu,
- 2) unutrašnju antenu ugrađenu u tiskanu pločicu radi smanjenja troškova,
- 3) vanjski USB priključak za povezivanje s računalom,
- 4) integrirano osjetilo temperature i osjetilo vlažnosti,
- 5) jedinstvenu adresu radi prepoznavanja svake pojedine nadzorne točke.



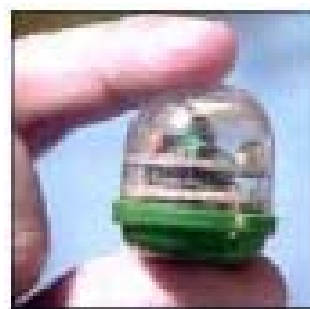
a) CWC: „Wiro”



US Berkeley: „Smart Dust”



VTT Electronics: „Soap Box”

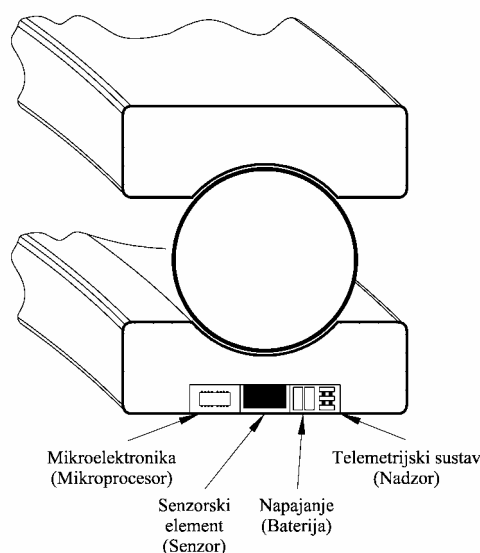


JPL: „Sensor Webs”

**Slika 7.7** Primjeri sklopova s osjetilima nazivom proizvođača

Trenutačno je u fazi istraživanje na novoj „Spec” platformi koja integrira funkcionalnost „Mica” na 5 mm čipu. „Spec” platforma sastoji se od mikro radija s analogno-digitalnim pretvaračem i temperaturnim osjetilom na jednom integriranom sklopu koji ima utrošak energije od samo jedne tridesetine postojećih integriranih sklopova. Taj je sklop s jednim osjetilom potpuno prikladan da postane jeftin (komercijalan).

Prednosti u tehnologijama osjetila, mikro-elektro-mehaničkim sustavima (MEMS) i odgovarajućim sučeljima, procesiranje signala i umrežavanje učinili su mogućim stvaranje visokofunkcionalnih inteligentnih osjetila i povezivanje velikog broja osjetila za distribuiranje mjerne i kontrolne aplikacije. Umrežavanje velikog broja inteligentnih osjetila omogućava monitoring i kontrolu vrlo širokog opsega aplikacija kao što je npr. industrijski nadzor procesa, a u koje zasigurno pripada i kontrola stanja kotrljajnih kugličnih ležajeva.



**Slika 7.8** Primjer mjesta ugradnje bežičnog osjetila u kotrljajnom kugličnom ležaju [139]

Određeni radovi [140] razvili su sustavan pristup za konstruiranje kotrljajnih kugličnih ležajeva s ugrađenim osjetilima (eng. *smart bearing*). Istražene su i strukturne implikacije izmjenom ležišta vanjskog prstena kotrljajnog ležaja za smještaj sklopa s osjetilom [140]. U odnosu na konvencionalne ležajeve, ležaj s ugrađenim osjetilom ima izrazite prednosti u mogućnosti praćenja i nadzora ispravnog radnog stanja kako bi se spriječili katastrofalni kvarovi pojavom uzročnika paljenja, a izazvani kvarom ležaja. Eksperimentalna istraživanja [140] pokazala su prednosti integriranog osjetila, gdje su mjerene vibracije istodobno pomoću ležaja s integriranim

osjetilom i vanjskim osjetilom koji je instaliran na ležajno kućište. Usporedba signala vremena i frekvencije, prikupljena pomoću oba osjetila pokazala je da signali dobiveni pomoću sklopa s osjetilom ugrađenog u ležaj sadrže specifične komponente frekvencije koje nisu bile vidljive pomoću vanjskog osjetila.



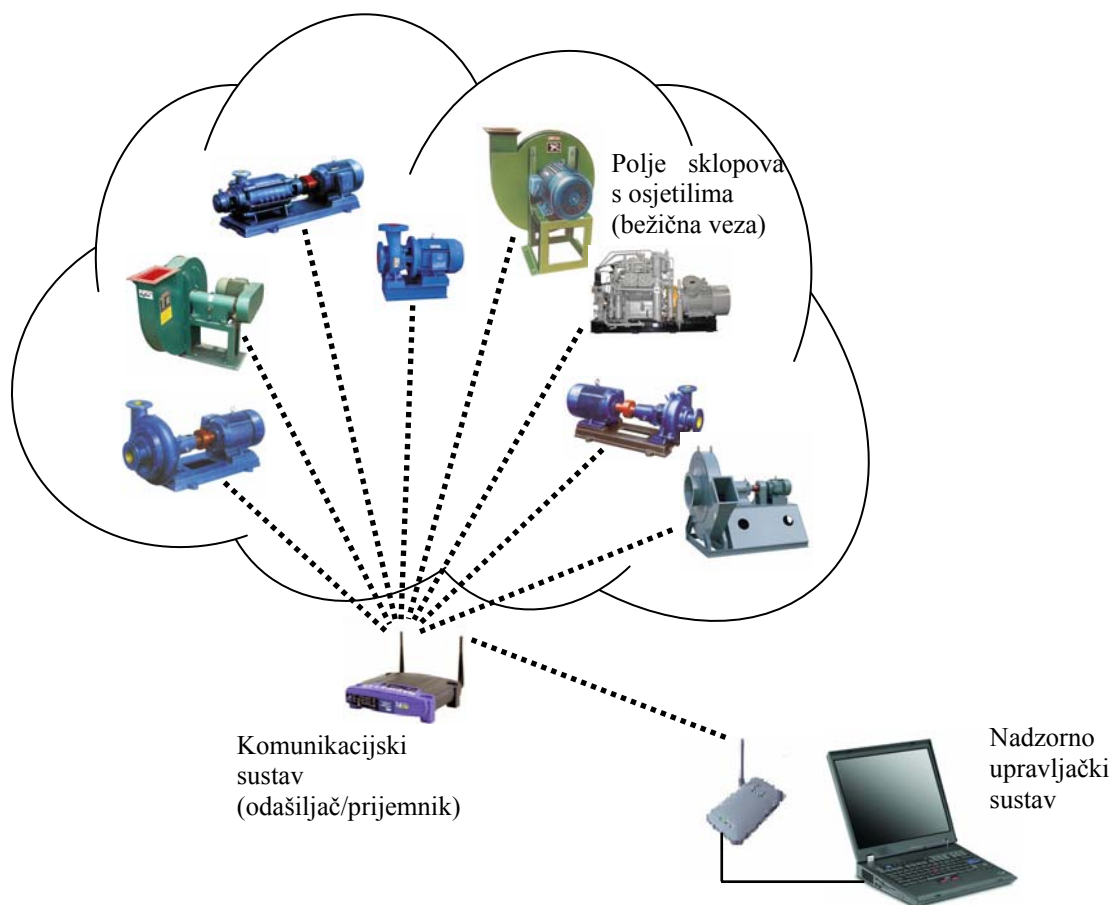
**Slika 7.9** Bežični sklop s osjetilom u kotrljajnom kugličnom ležaju [141]

#### **7.4 Bežične mreže sklopova s osjetilom (eng. *Wireless sensor networks* - WSN)**

Drugi način ostvarenja nadzora kotrljajnih kugličnih ležajeva kao uzročnika paljenja je pomoću bežične mreže sklopova s osjetilom (eng. *Wireless Sensor Networks* - WSN). Područje WSN-a javlja se prije tridesetak godina. Razvoj bežičnih mreža sklopova s osjetilom izravno je uvjetovan razvojem poluvodičke tehnologije (tranzistori), koja svojom veličinom uvjetuje snagu, djelotvornost, a time i iskoristivost bežičnih mreža sklopova s osjetilom (WSN). Kao vrlo važan čimbenik u razvoju bežičnih mreža sklopova s osjetilom (WSN) treba navesti kretanje cijena poluvodičkih komponenti od kojih su WSN građene. Danas su cijene WSN-a vrlo prihvatljive te se sve više komercijaliziraju.

Primjenom WSN-a u industrijskim postrojenjima s eksplozivnom atmosferom, u cilju nadzora uzročnika paljenja u kotrljajnim kugličnim ležajevima, zasigurno bi se pridonijelo smanjenju troškova i unapređenju održavanja te poboljšanju performansi kod strojeva, a time i značajnom povećanju sigurnosti sa stajališta protueksplozijske zaštite postrojenja (slika 7.10). Ugrađivanje sklopova s osjetilom u područja nedostupna čovjeku, s ciljem nadzora temperature kod kotrljajnih kugličnih ležajeva, temeljni je primjer primjene nadzora uzročnika paljenja pomoću aplikacija osjetila. Jedan od bitni osjetila jest da omogućuju višestruka ili matrička mjerenja: mjerenja stotina ili tisuća osjetila zapisuju se u bazu koja se zatim može pregledavati, pa se na taj

način dolazi do informacija u realnom vremenu, što je od velikog značaja u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom.



**Slika 7.10** Shematski prikaz nadzora temperature kotrljajnih kugličnih ležajeva pomoću bežične (eng. *wireless*) veze između sklopa s osjetilom i sustava nadzora

Bežične mreže sklopova s osjetilom, pouzdane su u radu, posjeduju visoku točnost te nisku cijenu. Razmjerno jednostavna ugradnja i instalacija čini ih pogodnim za primjenu u industrijskim postrojenjima [142]. Sklopovi s osjetilom baterijski su napajani, tako da energijska efikasnost modula ima izravan utjecaj na životni vijek sklopa s osjetilom. Povezanost sklopova s osjetilom u mreži može imati i negativan utjecaj; kada modul prestane s radom, ne prestaje samo njegovo prikupljanje podataka, nego i čitava mreža gubi raspoloživost da preko njega dalje prosljeđuje („rutira”) podatke. Zbog toga energijska učinkovitost ima izravan utjecaj na to koliko će dugo individualni sklop s osjetilom, ali i čitava mreža, uspješno funkcionirati. Snaga kojom osjetila rade znatno je niža od najmanje snage koja može biti uzročnik paljenja eksplozivne atmosfere (2 W za skupinu IIC, 3,5 W za skupinu IIB i 6 W za skupinu IIA).



Male dimenzije sklopa s osjetilom neophodne su kako ne bi utjecale na mjerne rezultate. Njihova veličina i težina dominantno su određene veličinom i težinom baterije. No zahtjev za malim dimenzijama baterije obratno je proporcionalan njezinu životnom trajanju. Zato osjetila moraju imati veliku učinkovitost, jer bi česte promjene baterije povećale troškove nadzora i održavanja. Najviše energije troši se na radijsku komunikaciju. Neophodno je da se i obrada podataka provodi na razini osjetila jer se tako i produžuje trajanje baterije.

Temeljne prednosti bežičnih mreža sklopova s osjetilima u odnosu na konvencionalne žičane jesu:

- doseg mreže – mreža može biti proširena do mjesta koja ne mogu biti povezana žičanom instalacijom;
- veća fleksibilnost – bežične mreže pružaju veću fleksibilnost i lakše se adaptiraju na promjene u konfiguraciji mreže;
- smanjenje vlastitih troškova – dok početno ulaganje zahtijevano za bežične mreže može biti veliko, troškovi cjelokupne instalacije i troškovi njihova „doživotnog” održavanja mogu biti značajno niži u dinamičkim sredinama;
- skaliranje – bežični sustavi mogu biti konfigurirani u različitim topologijama s ciljem postizanja specifične aplikacije i instalacije. Konfiguracije mogu biti lako promijenjene od „peer-to-peer” mreža za mali broj opreme do velikih infrastrukturnih mreža koje omogućuju nadzor širokog područja.

Ograničenja koja treba prevladati kod uporabe bežičnih mreža jesu:

- tolerancija na kvar – kvar (greška) sklopa s osjetilom ne smije degradirati performanse cjelokupne mreže;
- održavanje pouzdanosti kroz održavanje razine IPL-a [57]
- održavanje potrebne razine SIL-a [122,123]
- skaliranje – primijenjeni mehanizam treba biti prilagodljiv širokom području dimenzija mreža (broj sklopova s osjetilom);
- troškovi – troškovi pojedinačnog sklopova s osjetilom trebaju biti niski;
- potrošnja energije – treba se držati minimalnom kako bi se proširio koristan vijek mreže. Energija predstavlja jedan od bitnih čimbenika ograničenja jer se sklopovi s osjetilom ne mogu dopunjavati. Energija se koristi za opažanje (eng. *sensing*), obradu podataka i za komunikaciju (najviše energije);
- hardverska i softverska ograničenja – sklop s osjetilom, pronalaženje lokacije sistema, antena, pojačala snage, modulacija, kodiranje, CPU, RAM;

- razvoj – predrazvoj i planovi za zamjenu i/ili održavanje sklopova s osjetilom;
- uvjeti okoliša – prašina, vibracije, toplina itd.

#### 7.4.1 Norme za komunikaciju kod bežičnih mreža

Komunikacija unutar WSN-a odvija se sukladno zahtjevima pojedinih normi. To pridonosi smanjenju troškova kao i jednostavnosti nadogradnje i povezivanja s drugim sustavima nadzora i upravljanja. Bežične mreže po normi IEEE 802.11 osiguravaju performanse slične onima u ožičenim mrežama. Istodobno, IEEE je uočio prednosti i niske cijene koje pružaju mreže sklopova s osjetilom. Ustanovljena je nova norma IEEE 802.15 koja se odnosi na tzv. osobne mrežne sustave (PANs) koji imaju dopušteni radijus od 5 m do 10 m. Mreže sklopovima s osjetilom kratkog dometa pogodne su za PANs sustave. IEEE potiče razvoj algoritama i tehnologija za razvoj takvih sustava. Također dolazi do pada energetske potrošnje po bitu informacije, za procesiranje i komunikaciju.

Norme bežičnih mreža koje se u praksi pojavljuju jesu:

- a) IEEE 802.11x
- b) *Bluetooth* (IEEE 802.15.1 i .2)
- c) IEEE 802.15.4

Add a) IEEE 802.11x

IEEE 802.11x je norma koja je prvenstveno namijenjena lokalnoj mreži s razmjerno visokom širinom pojasa između računala i ostalih uređaja. Brzina prijenosa podataka je od 1 Mbps do 50 Mbps. Uobičajeno prijenosno područje je 100 m sa standardnom antenom.

Nazivaju se još i *Wireless LAN* (WLAN).

Nakon spajanja, uređaj s drugim uređajima komunicira preko TCP/IP protokola. „Tehnologija kartice” radi većom snagom i troši više energije u odnosu na *Bluetooth*. Deset su puta skuplji od *Bluetootha*.

Add b) *Bluetooth* (IEEE 802.15.1 i 2)

*Bluetooth* je osobna područna mreža (eng. *Personal Area Network* - PAN) koja posjeduje manju snagu od norme IEEE 802.11. Prvotno je zamišljeno da opslužuje aplikacije za prijenos podataka između računala i perifernih jedinica kao što su npr. mobilni telefoni i dr.

Kad su određene tvrtke izradile mrežu temeljenu na *Bluetooth* tehnologiji, susrele su se s određenim ograničenjima vezanim za *Bluetooth* protokol, uključujući sljedeće:

- 1) razmjerno visoka snaga za malo područje prijenosa podataka;
- 2) određeni sklopovi s osjetilom trebaju dugo vrijeme sinkronizacije s mrežom kad se vraćaju iz određenog „*sleep*” stanja koje povećava prosječnu snagu sustava (i potrošnju energije);
- 3) mali broj sklopova s osjetilom po mreži (cca  $\leq 7$ ).

Kod *Bluetooth* tehnologije izlazna snaga je vrlo mala, što minijaturnim uređajima posebno pogoduje zbog male potrošnje električne energije. Trenutačna proizvodna cijena *Bluetooth* čipa manja je od 10 dolara. Usluga *Bluetootha* je besplatna jer operira u 2.4 GHz besplatnom licenciranom pojasu korištenjem FHSS (eng. *Frequency Hopping Spread Spectrum*) pristupa. Trenutno omogućuje brzine prijenosa od 2 Mbps i područje dosega od 200 m u unutarnjim prostorijama.

#### Add c) IEEE 802.15.4

IEEE 802.15.4 je norma koja je specijalno projektirana za zahtjeve bežičnih mreža sklopova s osjetilom. Taj je standard vrlo fleksibilan te posjeduje određene višestruke brzine prijenosa i višestruke prijenosne frekvencije. Zahtjevi za snagom su umjereno mali.

Norma posjeduje sljedeće karakteristike:

- prijenosnu frekvenciju 868 MHz/902–928 MHz/2.48–2.5 GHz;
- brzinu prijenosa podataka 20 Kbps (868 MHz Band) 40 Kbps (902 MHz band) i 250 Kbps (2.4 GHz band);
- podržava umreženost u obliku zvijezde i povezanost svaki-sa-svakim (eng. *mesh*).

ZigBee se temelji na IEEE normi 802.15.4, ali se ta dva pojma često poistovjećuju. ZigBee je bežični komunikacijski protokol namijenjen osobnim mrežama s malom propusnošću i malom potrošnjom energije. Ciljane primjene ZigBeea su aplikacije koje zahtijevaju umrežavanje velikog broja uređaja, prijenos male količine podataka, malu potrošnju energije te visoku sigurnost prijenosa.

ZigBee je posebno fokusiran na potrošnju energije te mu je cilj da uređaji rade godinama s istim jeftinim baterijama. Područje prijenosa je od 10 m do 100 m, ovisno o izlaznoj snazi i karakteristikama sredine.

**Tablica 7.1** Usporedba bežičnih tehnika

Parametar	Bluetooth	WLAN	ZigBee
Područje	10 m	100 m	30-100 m
Pridružena norma	IEEE 802.15.1	IEEE 802.11	IEEE 802.15.4
Frekvencijsko područje	2.4 GHz	2,4 GHz ili 5 GHz	0,868, 0,915, 2 GHz
Najviša brzina prijenosa	1 Mbps	5,5/11/54 Mbps	20/40/250 kbps
Prosječna RF energija	172,5/100 mW	40-800 mW	200-50 $\mu$ W
Trajanje baterije	1-7 dana	0,5-5 dana	100-1000 dana
Cijena po sklopu s osjetilom	15 \$	20 \$	10 \$
Glavna primjena	zamjenjuje kabele	bežično umrežavanje (eng. <i>Wireless Ethernet</i> )	nadzor i upravljanje

### 7.5 Zaključni osvrt na prijedlog zaštitnog sustava kotrljajnog kugličnog ležaja

Primjena nadzora uporabom WSN-a u industrijskim postrojenjima s eksplozivnom atmosferom značajno bi povisila razinu sigurnosti. Također bi se smanjili troškovi vezani za ugradnju i održavanje električnih instalacija. Osim toga, izostavljanjem žičane (kabelske) instalacije uklonili bi se uzročnici koji se u njoj mogu pojaviti (kratki spoj, zemljospoj i sl.), definirani normom HRN EN 60079-14. Konstrukcijom sklopa s osjetilom treba spriječiti razvoj uzročnika paljenja koji se može pojaviti u samom izvoru napajanja sklopa s osjetilom, odnosno u bateriji.

Primjenom suvremenog sustava nadzora pomoću WSN-a, a zatim i upravljanja rotacijskim strojevima, omogućilo bi se znatno smanjenje brojnosti, potrebne specijaliziranosti i vremena obuke operatera. Istodobno, sustav nadzora pomoću WSN-a osigurava viši stupanj funkcionalnosti, pouzdanosti i sigurnosti rada opreme od uobičajenog sustava.

Potpuna arhitektura nadzora kotrljajnih kugličnih ležajeva, a sukladno s time i upravljanja opremom, može obuhvaćati više hijerarhijski uređenih slojeva te se pruža od pojedinačnih sklopova s osjetilom i aktuatora do informacijskih sustava [143]. Središnje slojeve, koji čine jezgru sustava nadzora i upravljanja, zauzimaju modularni, robusni i kompaktni PLC-ovi. Te procesorske jedinice prilagođene su za visoki stupanj distribuiranosti, jednostavno priključivanje na standardizirane signalne vodove sklopova s osjetilom i aktuatora i međusobno povezivanje s komunikacijskim mrežama na više razina. Daljnjim razvojem automatizacijskih sustava omogućit će se još veća kvaliteta nadzora kotrljajnih kugličnih ležajeva i projektiranje zaštitnih sustava. Tome će sigurno pridonijeti i razvoj automatske detekcije i lokalizacija kvarova.

Jedno od najvažnijih područja razvoja jest pitanje međusobnog povezivanja komponenti i podsustava iz različitih izvora, gdje će sve veća standardizacija, otvorenost i „*plug and play*” način instalacije omogućiti uistinu jednostavno konfiguriranje i rekonfiguriranje upravljačkog sustava.

I na kraju, za očekivati je sve veći stupanj automatiziranosti sustava upravljanja i nadzora, uz uključivanje sve veće količine umjetne inteligencije i autonomije na svim razinama, od upravljanja pojedinačnim aktuatorima, preko složenih zaštitnih funkcija, do moćnih alata za analizu ponašanja čitavog sustava.

Danas se značajan razvoj odvija u smjeru toga da se osjetilo, procesor i komunikacijska jedinica smještaju u jednom integrirani sklop, što smanjuje cijenu i omogućava primjenu u još većem broju. Predviđa se da će razvoj MEMS tehnologije u budućnosti omogućiti još veće kapacitete čipova te veću raznolikost.

## 8. ZAKLJUČAK

Kako bi se istražio učinak oštećenja u kotrljajnom kugličnom ležaju SKF 6206 na paljenje eksplozivne atmosfere, što je bio cilj rada, ispitane su tri skupine kotrljajnih ležajeva s različitim lokacijama oštećenja.

Uzevši u obzir razmjerno malen broj ispitivanih uzoraka, ali statistički značajan i opravdan broj, nužno je bilo izvesti oštećenja na mjestima i na način koji što sličnije odgovaraju oštećenjima koja nastaju u praktičnoj primjeni rotacijskih strojeva. Oštećenja se mogu pojaviti zbog tehnološkog i eksploatacijskog okoliša (npr. prašina, upadi krhotina, čađa i dr.) ili zbog gubitaka mehaničkog stanja (npr. dotrajalosti ležaja, pogrešaka u materijalu, povećanja zračnosti, nedostatka maziva i dr.).

Na ispitivanim uzrocima u ovisnosti o skupini kotrljajnih kugličnih ležajeva izrađena su različita oštećenja:

- skupina A – oštećenje vanjskog prstena,
- skupina B – oštećenja unutarnjeg prstena,
- skupina C – oštećenje kaveza.

Kotrljajni kuglični ležajevi u ovome su radu promatrani s teorijskog i praktičnog aspekta primjene u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom kod strojne i električne rotacijske opreme. U radu opisana metodologija omogućila je prikaz utjecaja različitih lokacija oštećenja u kotrljajnom kugličnom ležaju na mogućnost paljenja eksplozivne atmosfere.

Prilikom ispitivanja, prikupljene su i pohranjene vrijednosti temperature na tri mjesta osjetila na vanjskom prstenu svakog kotrljajnog kugličnog ležaja. Vrijednost temperature u trenutku otkaza (zaribavanja) temeljni je čimbenik, jer uz termodinamičku energiju (toplinu) u kotrljajnom kugličnom ležaju tvori djelotvoran uzročnik paljenja eksplozivne atmosfere.

U kotrljajnim kugličnim ležajevima identificirana su, te praćena nadzorom temperature različita pojedinačna oštećenja. Na temelju podataka dobivenih prilikom praćenja temperature na oštećenim kotrljajnim ležajevima, identificirana je pojava djelotvornog uzročnika paljenja. Prediktivnom analizom dobivena su vremena paljenja plinova i para prema vremenu postizanja temperature pojedinih temperaturnih razreda. Za sva tri različita mjesta oštećenja (kavez, unutarnji i vanjski prsten) predikcijom vremena dobiveno je dosizanje temperature pojedinih temperaturnih razreda.

Primjenom prijedloga zaštitnog sustava ostvarena je mogućnost prekida rada kotrljajnih kugličnih ležajeva prije nastanka eksplozije te veća sigurnost opreme i zaštite ljudi od one koju

zahtijevaju normativni dokumenti i dosadašnji zahtjevi protueksplozijske zaštite. Uporaba nadzora temperature kotrljajnih kugličnih ležajeva u rotacijskim strojevima od velike je važnosti u industrijskim postrojenjima u kojima je eksplozivna atmosfera prisutna u normalnom radu i koja su klasificirana u zoni 1/21 i zoni 2/22.

Početna ispitivanja obuhvatila su ispitivanje ispravnog kotrljajnog kugličnog ležaja kako bi se dobili usporedni podaci s oštećenim ležajevima. Usporedbom temperaturne krivulje između ispravnog kotrljajnog kugličnog ležaja i onih s jednim od tri različite lokacije oštećenja, moguće je uvidjeti da je postizanje stacionarnog stanja (temperature) puno brže kod kotrljajnog kugličnog ležaja s oštećenjem.

Statističkom obradom analizirani su snimljeni podaci mjerenja temperature dobiveni ispitnim sustavom s kotrljajnim kugličnim ležajevima s različitim lokacijama oštećenja.

Regresijskom analizom ostvarena je matematička aproksimacija temperaturnih krivulja. Prediktivnom analizom tih temperaturnih krivulja prikazana su vremena dostizanja temperatura pojedinih temperaturnih razreda kao i temperature paljenja oblaka i sloja zapaljivih prašina. Utvrđeni su osnovni parametri za statističku analizu, koji opisuju temperaturne krivulje: vrijeme  $t_{po}$  i temperatura  $\vartheta_{po}$  početka otkaza te vrijeme  $t_z$  i temperatura  $\vartheta_z$  otkaza (zaribavanja). Razdoblja temperaturnih krivulja dobivenih ispitivanjem, koja su statistički analizirana, podijeljena su na razdoblje početka rada, razdoblje stacionarnog rada te otkazivanja ležaja. Usporedbom rezultata mjerenja temperature u razdoblju stacionarnog rada  $\mathcal{G}_s$  ispravnog kotrljajnog kugličnog ležaja i onoga s jednom od lokacija oštećenja, vidljivo je da nema izrazitih razlika. Temeljni uvjet paljenja eksplozivne atmosfere jest taj da temperatura koja se pojavljuje prilikom razdoblja otkaza (zaribavanja) kotrljajnog kugličnog ležaja bude viša od temperature paljenja plina, pare ili prašine. U skladu s tim proveden je test normalnosti koji je preduvjet regresijske analize rezultata ispitivanja kotrljajnih kugličnih ležajeva s oštećenjima (tč. 6.5). Provedbom regresijske analize opisane su temperaturne krivulje za svaku lokaciju oštećenja eksponencijalnom jednadžbom oblika  $\mathcal{G} = a \cdot e^{b \cdot t}$ , gdje su  $a$  i  $b$  parametri eksponencijalne jednadžbe. Za svaku eksponencijalnu jednadžbu određeni su, uz razinu povjerenja 95,0 %, parametri  $a$  i  $b$ , donja i gornja granica povjerenja, t-vrijednost, p-razina i standardizirana vrijednost. Nakon regresijom dobivenih eksponencijalnih jednadžbi za svaku lokaciju oštećenja, pomoću grafičkih prikaza papira normalne vjerojatnosti ostataka (eng. *Normal probability plot of residuals*), vidljiva je ravnomjerno odstupanje točaka oko pravca. Prema navedenom, može se smatrati kako podaci odgovaraju normalnoj razdiobi, što je inače osnovni uvjet primjene

provedenih analiza varijance F-testom. Usporedbom vremena početka otkaza  $t_{po}$  i vremena otkaza (zaribavanja)  $t_z$  kod ispitivanih kotrljajnih kugličnih ležajeva, dobiveni su prikazi intervala povjerenja s najvećim i najmanjim vrijednostima. Unutar njih prikazane su i vrijednosti stvarne statističke mjere (npr. srednja vrijednost) i to po pojedinom oštećenju (slika 6.31 i slika 6.33).

Tablica analize varijance pokazuje iznimnu značajnost razlika između vremena početka otkaza  $t_{po}$  i vremena otkaza (zaribavanja)  $t_z$  kod ispitivanih kotrljajnih kugličnih ležajeva, uz vjerojatnost pogreške prve vrste jednake 0,05.

Usporedbom temperature početka otkaza  $\mathcal{G}_{po}$  i temperature otkaza (zaribavanja)  $\mathcal{G}_z$  kod ispitivanih kotrljajnih kugličnih ležajeva, dobiveni su prikazi intervala povjerenja s najvećim i najmanjim vrijednostima. Unutar njih prikazane su i vrijednosti stvarne statističke mjere (npr. srednja vrijednost) i to po pojedinom oštećenju (slika 6.32 i slika 6.34).

Tablica analize varijance pokazuje izrazitu značajnost razlika između temperature početka otkaza  $\mathcal{G}_{po}$  i temperature otkaza (zaribavanja)  $\mathcal{G}_z$  kod ispitivanih kotrljajnih kugličnih ležajeva, uz vjerojatnost pogreške prve vrste jednake 0,05.

Prediktivnom analizom dobivena su vremena dostizanja pojedinih temperatura temperaturnih razreda kao i temperature dostizanja oblaka i sloja pojedine zapaljive prašine. Stoga je potvrđeno da su oštećenja u kotrljajnom kugličnom ležaju, koja se nalaze na unutarnjem i vanjskom prstenu te kavezu, djelotvorni uzročnici paljenja eksplozivne atmosfere. Temperature krivulje koje nastaju prilikom otkaza kotrljajnog kugličnog ležaja s različitim lokacijama oštećenja, statistički su zadovoljavajuće aproksimirane eksponencijalnom funkcijom. Na temelju definiranih eksponencijalnih funkcija moguće je prediktivnom analizom procijeniti vrijeme do pojave uzročnika paljenja eksplozivne atmosfere plinova, para i prašina.

Usporedbom prediktivnih vremena  $t_{pred}$  različitih oštećenja kotrljajnih kugličnih ležajeva s vremenima početka  $t_{po}$  i vremenima otkaza  $t_z$ , može se potvrditi hipoteza da su kotrljajni kuglični ležajevi s oštećenjem unutarnjeg prstena najdjelotvorniji uzročnici paljenja eksplozivne atmosfere plinova, para i prašine (tablica 6.34, 6.35 i 6.36).

Također, usporedbom vremena početka  $t_{po}$  i vremena otkaza  $t_z$  može se potvrditi hipoteza da različite lokacije oštećenja u kotrljajnom kugličnom ležaju utječu na vrijeme početka razvoja uzročnika paljenja eksplozivne atmosfere.

Na temelju istraživanja i analize dobivenih rezultata opisan je prijedlog sustava identifikacije i



nadzora uzročnika paljenja u kotrljajnim kugličnim ležajevima rotacijskih strojeva u industrijskim postrojenjima s eksplozivnom atmosferom. Predloženi sustav nadzora kotrljajnih kugličnih ležajeva morao bi se provoditi u zoni 1/21 i zoni 2/22 radi neophodnog povišenja razine sigurnosti, tj. sprječavanje pojave uzročnika paljenja eksplozivne atmosfere. Predloženi sustav može biti komunikacijski povezan žičanom ili bežičnom vezom. U cilju sigurnosti svakako je bolja predložena izvedba bežičnog sustava kako bi se eliminirali uzročnici paljenja koji se mogu pojaviti u komunikacijskim vezama – električnim kabelima (npr. kratki spoj i sl.). Predloženi bi sustav omogućio otkrivanje uzročnika paljenja u ranim razdobljima njihova nastanka, praćenje trendova promjene vrijednosti temperature te procjenu (predviđanje) vremena ili trenutka bezuvjetnog zaustavljanja stroja ili čitavog postrojenja. To bi svakako pridonijelo povećanju sigurnosti cjelokupnog postrojenja sa stajališta protueksplozijske zaštite kao i povećanju sigurnosti ljudi. Predloženi sustav svakako treba biti temelj za postupno uvođenje kontinuiranog sustava nadzora mehaničkih i električnih rotacijskih strojeva u industrijskim postrojenjima s eksplozivnom atmosferom, u cilju ranog otkrivanja uzročnika paljenja i zaštite od eksplozije.

## 9. LITERATURA

- [1] HRN EN 60079-10, Električni uređaji za eksplozivne atmosfere - 10. dio: Klasifikacija ugroženih prostora.
- [2] Marinović, J. J. N., Protueksplozijska zaštita za eksplozivnu atmosferu; 2. izmijenjeno i prošireno izdanje, Etekon Zagreb, 2005.
- [3] HRN EN 61241-10, Električni uređaji za uporabu u zapaljivoj prašini - 10. dio: Razredba prostora gdje se zapaljiva prašina nalazi ili se može nalaziti.
- [4] HRN EN 1127-1, Eksplozivne atmosfere - Sprječavanje i zaštita od eksplozije - 1. dio: Osnovna načela i metodologija.
- [5] Querol, E., Torrent, J.G., Bennett, D., Gummer, J., Fritze, J. P., Ignition tests for electrical and mechanical equipment subjected to hot surfaces, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 2006; 19: 639–644.
- [6] Hawksworth, S., Rogers R., Proust, Ch., Beyer, M., Schenck, S., Gummer, J., Raveau, D., Mechanical ignition hazards in potentially explosive atmospheres – EC project MECHEX, communication to the international ESMG symposium, Nürnberg, Germany, 16th-18th of March 2004.
- [7] Hawksworth, S., Rogers, R., Beyer, M., Proust, Ch., Mechanical ignition hazards, communication to the IMECHE symposium, U.K., 9th of March 2004.
- [8] Thornten, E. J., Armintor, J. K., *The Fundamentals of AC Electric Induction Motor Design And Application*, Turbomachinery Laboratory, Texas A&M University.
- [9] Proust, Ch., Hawksworth, S., Rogers, R., Beyer, M., Lakic, D., Raveau, D., Hervé, P., Pina, V., Petitfrecre, C. and Lefebvre, X., Development of a method for predicting the ignition of explosive atmospheres by mechanical friction and impacts (MECHEX), *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* (2007), doi:10.1016/j.jlp.2007.04.027.
- [10] Lanphier, M., Sen, P.K., Nelson, J.P., An update protection of medium voltage motors: a comparison of the standrads and applications, PCIC EUROPE, 4th Petroleum and Chemical Industry Conference Europe – Electrical and Instrumentation Applications Paris, June 13-15, 2007.
- [11] Thomson, W.T., *A Review Of On-Line Condition Monitoring Techniques For Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motors - Past Present And Future*.
- [12] Eckhoff, R. K., *Dust explosions in the process industries*; 3th edition, Gulf Professional publishing, Elsevier Science, 2003.

- [13] Lunn, G., Frictional ignition of powders: a review, Health and Safety Laboratory, Harpur Hill, Buxton, Derbyshire SK17 9JN, UK.
- [14] Billinge, K., The frictional ignition hazard in industry - a survey of reported incidents from 1958 to 1978., *Fire Prevention Science and Technology* 24, 13-19, (1979).
- [15] Schoeff, R.W., Case Study of Dust Explosion at DeBruce Grain Co. Terminal Elevator, Haysville, Kansas., 3rd Worldwide Seminar on the Explosion Phenomenon and on the Application of Explosion Protection Techniques in Practice, Ghent – Belgium, 1999
- [16] HRN EN 60079-0, Električni uređaji za eksplozivne plinske atmosfere - 0. dio: Opći zahtjevi.
- [17] HRN EN 13463-1, Neelektrični uređaji za eksplozivne atmosfere - 1. dio: Osnovne metode i zahtjevi.
- [18] HRN IEC 60079-7, Električni uređaji za eksplozivne plinske atmosfere - Dio 7: Povećana sigurnost „e”.
- [19] Weber, R., Preisgekrönte Abhandlung ber die Ursachen von Explosionen und Bränden in Mühlen, sowie ber die Sicherheitsmassregein zur Verhütung derselben. *Verh. Ver. Gew. Fließ.*, Berl , 83–103., 1878, (pp. 437-447).
- [20] Eckhoff, R. K., Current status and expected future trends in dust explosion research, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 2005; 18: 225-237.
- [21] Laboratorijska izvješća ispitivanja prašina, Laboratorij za protueksplozijsku zaštitu - ExLab, Ex-Agencija, Zagreb.
- [22] Barton, J., Dust explosions - prevention and protection - a practical guide, Institution of Chemical engineers (IchemE); 2002.
- [23] Bennett, D., Lunn, G. A., Torrent, J. V., Querol, E., Fritze, J. P., A test for electrical ignitions of flammable dust clouds, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 2003; 16: 33–40.
- [24] Eckhoff, R. K., Design of electrical equipment for areas containing combustible dust; Why dust standards cannot be extensively harmonised with gas standards, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 2000; 13: 201-208.
- [25] Eckhoff, R. K., Dust explosions in the process industries; 3th edition. Gulf Professional publishing, Elsevier Science; 2003.
- [26] Proust, C., A few fundamental aspects about ignition and flame propagation in dust clouds. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 2006; 19: 104–120.

- [27] Vozila, V., Rumbak, S., Mlinovi za mljevenje ugljena i transportne trake kao potencijalni uzročnici paljenja eksplozivne atmosfere u TE Plomin 1 i TE Plomin 2, Bilten Ex-Agencije 2005: 1-2.
- [28] Abbasi, T., Abbasi, S.A., Dust explosions - Cases, causes, consequences, and control, Review, Journal of Hazardous Materials 140, (2007), 7-44.
- [29] HRN EN 13463-5, Neelektrična oprema za eksplozivne atmosfere - 5. dio: Zaštita konstrukcijskom sigurnošću „c”.
- [30] HRN EN 60079-0, Električni uređaji za eksplozivne plinske atmosfere - 0. dio: Opći zahtjevi.
- [31] HRN EN 60079-1, Električni uređaji za eksplozivne plinske atmosfere - 1. dio: Oklapanje „d”.
- [32] Tandon, N., Choudhury, A., A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings, Tribology International 32, (1999), 469–480.
- [33] Tandon N, Nakra B.C., Vibration and acoustic monitoring techniques for the detection of defects in rolling element bearings - a review, Shock Vibr. Digest, 1992;24(3):3-11.
- [34] Kýral, Z., Karagülle, H., Vibration analysis of rolling element bearings with various defects under the action of an unbalanced force Mechanical Systems and Signal Processing, Article in press.
- [35] Kiral, Z., Karagülle, H., Simulation and analysis of vibration signals generated by rolling element bearing with defects, Tribology International 36,(2003),667-678.
- [36] Miettinen, J., Andersson, P., Acoustic emission of rolling bearings lubricated with contaminated grease, Tribology International 33 (2000) 777-787.
- [37] Rende, L., Dehua, T., Using oil analysis to study the wear condition of bearing in trunnion of converter during/after run-in razdoblje, Proc. of the 5th International Conference on Quality, Reliability and Maintenance QRM 2004, pp. 101-104, 2004.
- [38] Yi, J., Henao-Sepulveda, J., Toledo-Quinones, M., Wireless temperature sensor for bearing health monitoring, Proc. of SPIE 5391, pp. 368-376, 2004.
- [39] Schoen, R. R., Habetler, T.G., Kamran, F., Bartheld, R.G., Motor bearing damage detection using stator current monitoring, IEEE Trans. Industry Applications, vol. 13, pp. 1274-1279, 1995.
- [40] Yang, H., Mathew, J., Ma, L., Fault diagnosis of rolling element bearings using basis pursuit, Mechanical Systems and Signal Processing 19, (2005), 341-356.

- [41] Kim, P.Y., A review of rolling element bearing health monitoring (II): preliminary test results on current technologies. In: Proceedings of Machinery Vibration Monitoring and Analysis Meeting, Vibration Institute, New Orleans, LA, 26–28 June, 1984. p.127–37.
- [42] Nishio, K, Hoshiya, S., Miyachi T., An investigation of the early detection of defects in ball bearings by the vibration monitoring, ASME Paper 79-DET-45, New York, ASME, 1979.
- [43] Igarashi, T, Noda B, Matsushima E., A study on the prediction of abnormalities in rolling bearings (1). J JSLE Int 1980;1:71–6.
- [44] Tandon, N., Nakra, B.C., Comparison of vibration and acoustic measurement techniques for the condition monitoring of rolling element bearings, Tribol. Int. 1992;25(3):205-12.
- [45] Tandon, N., Nakra, B.C., Detection of defects in rolling element bearings by vibration monitoring, J Instn Engrs (India) - Mech Eng Div 1993;73:271-82.
- [46] Tandon, N., A comparison of some vibration parameters for the condition monitoring of rolling element bearings. Measurement 1994;12:285-9.
- [47] Yoshioka, T., Detection of rolling contact subsurface fatigue cracks using acoustic emission technique. Lubric Eng 1992;49(4):303-8.
- [48] Tandon, N., Nakra B.C., Defect detection in rolling element bearings by acoustic emission method, J Acoust Emission 1990;9(1):25-8.
- [49] Peng, Z., Kessissoglou, N.J., Cox, M., A study of the effect of contaminant particles in lubricants using wear debris and vibration condition monitoring techniques, Wear 258 (2005) 1651-1662.
- [50] Jardine, A. K. S., Lin, D., Banjevic, D., A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. Mechanical Systems and Signal Processing; Article in press.
- [51] Junsheng, C., Dejie, Y., Yu, Y., A fault diagnosis approach for roller bearings based on EMD method and AR model, Mechanical Systems and Signal Processing 2006; 20: 350-362.
- [52] Liu, B., Ling, S. F., Gribonval, R., Bearing failure detection using matching pursuit, NDT & International 2002; 35: 255-262.
- [53] Orhan, S., Aktürk, N., Celik, V., Vibration monitoring for defect diagnosis of rolling element bearings as a predictive maintenance tool: Comprehensive case studies, NDT&E International 2006; 39: 293-298.

- [54] Yang, H., Mathew, J., Ma, L., Fault diagnosis of rolling element bearings using basis pursuit, *Mechanical Systems and Signal Processing* 2005; 19: 341-356.
- [55] HRN EN 14986, Konstrukcija ventilatora za potencijalno eksplozivne atmosfere.
- [56] HRN EN 13463-8, Neelektrična oprema za eksplozivne atmosfere - 8. dio: Zaštita uranjanjem u tekućine „k”.
- [57] HRN EN 13463-6: Neelektrična oprema za eksplozivne atmosfere - 6. dio: Zaštita nadzorom uzročnika paljenja „b”.
- [58] Directive 1999/92/EC of the European parliament and of the council, On minimum requirements for improving the safety and health protection of workers potentially at risk from explosive atmospheres, 16 December 1999.
- [59] Directive 94/9/EC of the European parliament and the council, On the approximation of the laws of the Member States concerning equipment and protective systems intended for use in potentially explosive atmospheres, 23 March 1994.
- [60] Pravilnik o najmanjim zahtjevima sigurnosti i zaštite zdravlja radnika te tehničkom nadgledanju postrojenja, opreme, instalacija i uređaja u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom, *Narodne novine, Republike Hrvatske* br. 39/06.
- [61] Pravilniku o opremi i zaštitnim sustavima namijenjenim za upotrebu u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom, *Narodne novine, Republike Hrvatske* br. 123/05.
- [62] *Electrical equipment for hazardous areas* Published by Standards Australia International Ltd, Third edition 2000.
- [63] HRN EN 1839, Određivanje granica eksplozivnosti za plinove i pare.
- [64] HRN EN 13673-1, Određivanje najvećeg tlaka i najvećeg porasta tlaka eksplozije plinova i para - 1. dio: Određivanje najvećeg tlaka eksplozije.
- [65] Crawl, D. A., *Understanding Explosions*, Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, 2003.
- [66] HRN EN 14522, Određivanje temperature samozapaljenja plinova i para.
- [67] ISO 4225, *Air quality - General aspects – Vocabulary*.
- [68] NFPA 68, *Standard on explosion protection by deflagration venting*.
- [69] BS 2955, *Glossary of terms relating to particle technology*.
- [70] HRN EN 13821, *Eksplozivne atmosfere - Sprječavanje eksplozije i zaštita - Određivanje najmanje energije paljenja smjesa prašina/zrak*.
- [71] Powell, F., *Safety against Explosions*, 9th Intl. Symp. On Prevention of Occupational Accidents and Diseases in the Chemical Industry, June 1981.

- [72] Spencer, H., Rew, P.J., Ignition probability of flammable gases, contract research report 146/1997.
- [73] Lees, p. F., Loss Prevention in the Process Industries, Hazard Identification, Assessment and Control, Volume 2.
- [74] Medard, L.A. Accidental Explosions, 2 Volumes, John Wiley & Sons, New York, 1989.
- [75] HRN EN 60079-4, Metoda određivanja temperature paljenja.
- [76] HRN IEC TR 60079-20, Podaci o zapaljivim plinovima i parama u odnosu na uporabu električnih uređaja.
- [77] Bottrill, G., Cheyne, D., Vijayaraghavan, G., Practical Electrical Equipment and Installations in Hazardous Areas, Elsevier, 2005.
- [78] Lees, F. P., Loss Prevention in the Process Industries, Hazard Identification, Assessment and Cont, Volume 2, 2nd edition Butterworths-Heinemann, 1996.
- [79] Rae, D., Singh, B., Danson, R., The Size and Temperature of a Hot Square in a Cold Surface necessary for the Ignition of Methane. Res. Rep. 224. Safety in Mines Res. Estab., Buxton, 1964.
- [80] Mullen, J.W., Fenn, J.B., Irby, M.R., The Ignition of high velocity streams of combustible gas by heated cylindrical rods. Combustion, 3, 317. 1949.
- [81] Goodall, D. G., Ingle, R., The Ignition of flammable liquids by hot surfaces, Fire Technol., 3, 115, 1967.
- [82] Bull, D. C., Autoignition at hot surfaces. Loss Prevention and safety Promotion 2, p.165, 1977.
- [83] Dyduch, Z., Majcher, B., Ignition of a dust layer by a constant heat flux-heat transport in the layer, Journal of Loss Prevention in the Process Industries 19 (2006) 233–237.
- [84] HRN EN 61241-2-1 Električni uređaji za upotrebu u zapaljivoj prašini - 2. dio: Metode ispitivanja - 1. odjeljak: Metoda određivanja najmanje temperature paljenja prašine.
- [85] Beck, H, Glienke, N, Möhlmann C, BIA-Report, Combustion and Explosion Characteristics of Dusts, BIA report 13/97, Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften, Sankt Augustin, 1997.
- [86] ASTM E2021-01 Standard Test Method for Hot-Surface Ignition Temperature of Dust Layers.
- [87] HRN IEC 61241-0, Električni uređaji za upotrebu u zapaljivoj prašini - 0. dio: Opći zahtjevi.

- [88] HRN EN 61241-1- „1”, „2” ili „3” Električni uređaji za uporabu u zapaljivoj prašini - 1. dio: Električni uređaji zaštićeni kućištima -1. odjeljak: Specifikacije za uređaje; 2. odjeljak: Izbor, instalacija i održavanje.
- [89] Cox, A.W., Lees, F. P., Ang, M. L., Classification of Hazardous Location Courtesy of Institution of Chemical Engineers, 1990.
- [90] Maddison, N., ATmosphere EXplosive (ATEX) Directive & the Dangerous Substances & Explosive Atmosphere Regulation (DSEAR).
- [91] Hughes, G., Hanif, S., A Comparasion of Accident Experience With Quantitative Risk Assessment (QAR) Methodology, Contract Research Report 293/2000, Det Norske Veritas Ltd, 2000.
- [92] Crowl, D. C., Understanding Explosion, Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, 2003.
- [93] Nolan, D. P., Handbook of Fire and Explosion Protection Engineering Principles for Oil, Gas, Chemical and Related Facilities, Noyes Publications, 1996.
- [94] [http://www.firesandexplosions.ca/hazards/ignition\\_sources.php](http://www.firesandexplosions.ca/hazards/ignition_sources.php)
- [95] Astbury, G. R., Report Number HSL/2006/09 - Review of Unidentified Ignition Sources of Unplanned Flammable Releases - Comparison of Offshore and Onshore.
- [96] Girdhar, P., Moniz, O., Practical Centrifugal Pumps Design, Operation and Maintenance, Elsevier, 2005.
- [97] Orłowski, D., Extending Motor Bearing Life, Pumps & Systems, June 2008.  
<http://www.pump-zone.com/motors/motors/extending-motor-bearing-life.html>
- [98] Agrawal, K. C., Industrial Power Engineering and Applications Handbook, Butterworth-Heinemann, 2001.
- [99] Kiameh, P., Electrical Equipment Handbook, McGraw-Hill, 2004.
- [100] Hewitson, L., Brown M., Ramesh, B., Practical Power Systems Protection, Elsevier, 2004.
- [101] Yeadon, W. H., Yeadon, A. W., Handbook of Small Electric Motors, McGraw-Hill, 2001.
- [102] Prevention of Grain Elevator and Mill Explosions, National Materials Advisory Board, Publication NMAB 367-2, Washington, 1982.
- [103] Bartec, brochure Dust explosion protection 08/2005.
- [104] STAHL Schaltgeräte GmbH, The basics of dust-explosion protection, S-PB-dustex-00-en-04/2004.



- [105]Ebadat, V., Pilkington, Accessing dust explosion hazard in powder handling operations, Minimizing dust explosion hazard throught testing, prevention and protection, Powder & Bulk Solids Safety, September 1995.
- [106]Thyer, A., Development of a Fire and Explosion Risk Assessment Methodology for Underground Mines, Health & Safety Laboratory, 2002.
- [107][http://www.skf.com/portal/skf\\_ba/home/services?contentId=260149&lang=bs](http://www.skf.com/portal/skf_ba/home/services?contentId=260149&lang=bs)
- [108]Harris, T. A., Kotzalas, M. N., Advanced concept of bearing technology, Taylor & Francis Group, 2007.
- [109]FAG Kugelfischer AG, Rolling Bearing Damage Recognition of damage and bearing inspection, Publ. No. WL 82 102/2 EA.
- [110]T. Williams, T., Ribadeneira, X., Billington, S., Kurfess, T., Rolling element bearing diagnostics in run-to-failure lifetime testing, Mechanical System and Signal Processing (2001) 15(5), 979-993.
- [111]SKF, Bearing failures and their causes, Publication PI 401 E, 1994.
- [112]Mobley R. K., Higgins L. R., Wikoff, D. J., Maintenance Engineering Handbook, Seven Edition, McGraw-Hill, 2008.
- [113]HRN EN 13237, Eksplozivne atmosfere - Nazivlje i definicije za opremu i zaštitne sustave za uporabu u ugroženim prostorima
- [114]Norma ISO 281, Rolling bearings - Dynamic load ratings and rating life.
- [115]HRN EN 60529, Stupnjevi zaštite osigurani kućištima.
- [116]Korver, W. O. E., Electrical Safety in Flammable Gas/Vapour Laden Atmosphere, Noyes Publications, Norwich, Ney York, 2001.
- [117]RU-048, Priprema, pričvršćenje, spajanje, produženje i uporaba termoparova, Priručnik kvalitete Ex-Agencije, PQI.
- [118]RU-049, Prihvaćanje termoparova, Priručnik kvalitete Ex-Agencije, PQI.
- [119]HRN EN 61241-2-1, Električni uređaji za upotrebu u zapaljivoj prašini - 2. dio: Metode ispitivanja - 2. odjeljak: Metoda određivanja električnog otpora prašine u slojevima.
- [120]HRN IEC 61241-2-3, Električni uređaji za upotrebu u zapaljivoj prašini - 2. dio: Metode ispitivanja - 3. odjeljak: Metoda određivanja najmanje energije paljenja smjese zraka i prašine
- [121]Statistica 6.0 – programski paket.
- [122]IEC 61508, Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic (E/E/PE) safety related systems. Parts 1–7. IEC.

- [123] IEC 61511, Functional safety: Safety instrumented systems for the process industry sector. Parts 1–3. IEC.
- [124] Norma EN 954-1, Safety of machinery - Safety-related parts of control systems - Part 1: General principles for design, CEN.
- [125] EN 15233, Methodology for functional safety assessment of protective systems for potentially explosive atmospheres, CEN.
- [126] EN 15198, Methodology for the ignition hazard assessment of non-electrical equipment and components for intended use in potentially explosive atmosphere, CEN.
- [127] Kosmowski, K. T., Functional safety concept for hazardous systems and new challenges, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 19 (2006) 298–305.
- [128] Rumbak, S., Metodologija za procjenu rizika neelektrične opreme namijenjene upotrebi u potencijalno eksplozivnim atmosferama, *Ex-Bilten*, broj 1/2, 2004.
- [129] Rumbak, S., Šakić, N., Procjena rizika opreme temeljen na EU direktivi 94/9/EC („Atex”) međunarodna konferencija, MATEST 2005, Opatija.
- [130] Halep, A., Procjena stanja kotrljajućih ležaja, 12. Međunarodno savjetovanje HDO-a Održavanje 2006, 16–18.05.2006, Rovinj.
- [131] Rumbak, S., Vrsta protueksplozijske zaštite neelektrične opreme: Zaštita kontrolom uzročnika paljenja „b”, *Ex-Bilten Agencije za prostore ugrožene eksplozivnom atmosferom*, Ex-Agencija, broj 1–2, 2004.
- [132] Petitfrere, C., Proust, C., Analysis of ignition risk on mechanical equipment in ATEX, PCIC Europe, Paris, 2007.
- [133] Proust, C., Hawskworth, S., Rogers, R., Beyer, M., Lakic, D., Raveau, D., Herve, P., Pina, V., Petitfrere, C., Lefebvre, X., Development of a method for predicting the ignition of explosive atmospheres by mechanical friction and impacts (MECHEX), HPMIE, Halifax, 2006.
- [134] Proust C., Raveau D., Toward modelling of frictional ignition Loss prevention and safety promotion in the process industries, *Proceedings of the 11th International Symposium*, 31 May - 3 June 2004, Praha, Czech Republic
- [135] Hawskworth S., Rogers R., Proust Ch., Beyer M., Schenck S., Gummer J., Raveau D., Ignition of explosive atmospheres by mechanical equipment, *I.Chem. Symp. Series 150*
- [136] Sheldrake A. L., *Handbook of Electrical Engineering for Practitioners in the Oil, Gas and Petrochemical Industry*, John Wiley & Sons Ltd, 2003

- [137] Katalog tvrtke SKF-a, SKF Sensor-Bearing Units concentrate intelligence in your motion control, Publication 5106/II E, 2003.
- [138] HRN EN 60079-14 Električni uređaji za eksplozivne plinske atmosfere - 14. dio: Električne instalacije u ugroženim prostorima (osim rudnika).
- [139] Holm-Hansen, T. B., Gao, R. X., Vibration Analysis of a Sensor-Integrated Ball Bearing, *Journal of Vibration and Acoustics* 122, 2000.
- [140] Holm-Hansen, T. B., Gao, R. X., Structural Design And Analysis For A Sensor-Integrated Ball Bearing, *Finite Elements in Analysis and Design* 34, 2000, 257-270.
- [141] High Performance Sensors for Rolling Element Bearing Health Monitoring <http://www.sentientscience.com>.
- [142] Hakemeyer, F., Wireless in Industry, 3rd Petroleum and Chemical Industry Conference Europe –Electrical and Instrumentation Applications, June 7 – 9, 2006 Amsterdam, The Netherlands.
- [143] Callaway, E. H., *Wireless Sensor Networks: Architectures and Protocols*, Auerbach Publications A CRC Press Company, 2004.

---

## KRATKI ŽIVOTOPIS

Slavko Rumbak rođen je 14. travnja 1974. u Zagrebu, gdje je završio osnovnu i srednju tehničku školu „Ruđer Bošković”, smjer strojarstvo. Nakon završetka srednjoškolskog obrazovanja, 1992. upisuje Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu. Na Katedri za mjerenje i kontrolu Zavoda za kvalitetu diplomira u srpnju 1998., kod mentora prof. dr. sc. Vedrana Mudronje, s radom „Značajke kvalitete kotrljajućih ležajeva”.

Nakon završetka studija zapošljava se u tvrtci Končar („Končar – protueksplozijski zaštićeni uređaji i sustavi”), gdje odrađuje pripravnički staž. U istoj tvrtki nastavlja rad na mjestu konstruktora za protueksplozijski zaštićene uređaje. Od veljače do studenog 2000. služi vojni rok. U veljači 2002. uspješno polaže stručni ispit pri Društvu inženjera Hrvatske u Zagrebu.

U ožujku 2002. započinje s radom u Agenciji za prostore ugrožene eksplozivnom atmosferom (Ex–Agenciji) Vlade Republike Hrvatske, gdje radi na mjestu voditelja tima za neelektričnu opremu. Iste godine upisuje poslijediplomski studij, smjer Industrijsko inženjerstvo i menadžment.

Predsjednik je tehničkog pododbora ETO/TPO 31M pod nazivom: „Neelektrična oprema za rad u eksplozivnoj atmosferi”, u Hrvatskom zavodu za norme (HZN) gdje aktivno sudjeluje u njegovu radu.

Redovni je izlagač na seminaru iz protueksplozijske zaštite „PEX–seminar” s temom: „Neelektrična oprema za upotrebu u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom” pri Rudarsko–geološko–naftnom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu.

Od nastavne godine 2006./2007. vanjski je suradnik na vježbama iz predmeta Mjerenja u tehnici na Fakultetu strojarstva i brodogradnje.

Autor je nekoliko stručnih i znanstvenih članaka koji obrađuju problematiku protueksplozijske zaštite strojne opreme, provedbu procjene rizika te održavanje i dijagnostiku opreme u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom. Sudjelovao je na međunarodnim skupovima s temama o protueksplozijski zaštićenim uređajima.

Služi se engleskim jezikom u govoru i pismu.

---

## SHORT BIOGRAPHY

Slavko Rumbak was born 14<sup>th</sup> April 1974 in Zagreb, where he attended elementary school and graduated from “Ruder Bošković” high school with a major in mechanical engineering. In 1992 he enrolled in the University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture. He graduated from the Department of Measurements and Control of the Quality Institute in July 1998, under the mentorship of Dr. Vedrana Mudronje. The subject of his thesis was “Quality Characteristics of Ball Bearings”.

Upon graduation Slavko was employed by Končar (“Končar – explosion protected equipment and systems”), where he completed his internship. He continued to work in the same company designing explosion protected equipment, and from February to November of 2000 he served in the military. In February 2002 he successfully passed the expert exam of the Croatian Association of Engineers in Zagreb.

In March 2002 Slavko was employed by the Republic of Croatia Agency for Explosive Atmosphere Hazardous Areas (Ex-Agency), where he currently works as team leader for non-electrical equipment. The same year he enrolled in graduate studies, majoring in industrial engineering and management.

Slavko is president of technical subcommittee ETO/TPO 31M named: “Non-electrical equipment for use in explosive atmospheres”, at the Croatian Standards Institute (HZN) where he actively participates in its operations.

He also gives regular lectures at the explosion protection seminar “PEX–seminar” on the subject: “Non-electrical equipment for use in hazardous areas” at the Faculty of Geology and Mining Technology in Zagreb.

Since the 2006/2007 academic year, Slavko has been an associate of academic exercises in Technical Measurements, at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture.

Slavko is the author of several technical and scientific articles that deal with the problems of explosion protection on mechanical equipment, performing risk assessments and maintenance and diagnosis of equipment in hazardous areas. He has participated in international conferences with topics in explosion protected equipment.

He is fluent in English.