

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Martin Crneković

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Dragutin Lisjak, dipl. ing.

Student:

Martin Crneković

Zagreb, 2015.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru, prof. dr. sc. Dragutinu Lisjaku i asistentu Davoru Kolaru, mag. ing. mech.

Martin Crneković



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **MARTIN CRNEKOVIĆ** Mat. br.: 0035179696

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **MOGUĆNOSTI PRIMJENE KONCEPCIJE INTERNETA OBJEKATA U ODRŽAVANJU**

Naslov rada na engleskom jeziku: **APPLICATION POSSIBILITES OF INTERNET OF THINGS IN MAINTENANCE**

Opis zadatka:

Broj korisnika Interneta se kontinuirano povećava tijekom godina te je krajem 2014. godine taj broj dosegao gotovo 3 milijarde. Internet objekata (eng. *Internet of things*) je dio globalne mreže koji se odnosi na fizičke objekte povezane preko ugrađenih senzora i ostalih uređaja koji mogu prikupljati i preko Interneta prenositi informacije o objektima. Podaci prikupljeni pomoću ovih uređaja mogu se zatim analizirati kako bi se optimizirali proizvodi, usluge i operacije. Prognoze predviđaju da Internet objekata ima potencijal zamijeniti ljude kao najveći korisnik i proizvođač informacija na Internetu.

Mjerenje vibracija jedna je od najvažnijih metoda *održavanja po stanju*. Prikupljeni i obrađeni podaci temelj su za razvoj sposobnosti dijagnostike kvara. Za mjerenje i obradu podataka o vibracijama koriste se komercijalni alati, koji su često cijenama nepristupačni održavateljima u malim i srednjim poduzećima.

U okviru ovog rada je potrebno obraditi sljedeće teme:

1. Opisati koncepciju Interneta objekata i njegove mogućnosti primjene u području održavanja.
2. Dati prijedlog rješenja sustava za mjerenje vibracija u skladu sa koncepcijom Interneta objekata.
3. Na konkretnom primjeru prikazati mogućnosti prikupljanja i pohrane podataka o vibracijama primjenom mini računala *Raspberry PI 2*.
4. Zaključak.

Zadatak zadan:
7. svibnja 2015.

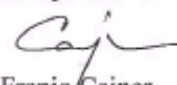
Rok predaje rada:
9. srpnja 2015.

Predviđeni datum obrane:
15., 16. i 17. srpnja 2015.

Zadatak zadao:


Prof. dr. sc. Dragutin Lisjak

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Franjo Cajner

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. INTERNET OBJEKATA	3
2.1. Potencijal tehnologije Interneta objekata	5
2.2. Internet objekata i Big Data	9
2.3. Internet objekata u proizvodnji	13
2.4. Internet if Things iz perspektive industrije poluvodiča	17
2.5. Internet objekata u području održavanja	19
3. MJERENJE VIBRACIJA NA STROJNOJ OPREMI	23
3.1. Postupak mjerenja i analize vibracija	25
3.2. Smjernice pri mjerenju vibracija	30
3.3. Rješenja koja trenutno postoje u području mjerenja vibracija	35
4. SUSTAV ZA MJERENJE VIBRACIJA PRIMJENOM INTERNETA OBJEKATA	36
4.1. Raspberry Pi 2	37
4.1.1. Pokretanje računala i namještanje operativnog sustava	41
4.2. Akcelerometar MPU-6050	44
4.3. Izrada sustava za mjerenje vibracija	46
4.3.1. Povezivanje računala i senzora	47
4.3.2. Prikupljanje podataka sa senzora	49
4.3.3. Provedba i rezultati mjerenja vibracija	52
4.3.4. Analiza dobivenih podataka	55
5. ZAKLJUČAK	61
LITERATURA	62

POPIS SLIKA

Slika 1.	Broj uređaja priključenih na Internet, u milijardama [2]	6
Slika 2.	Industrije koje predvode u uvođenju Interneta objekata u svojim pogonima [7] ..	13
Slika 3.	Održavanje po stanju optimizira troškove preventivnog i korektivnog održavanja [16].....	20
Slika 4.	Konstrukcija piezoelektričnog akcelerometra [18]	26
Slika 5.	Frekvencije pri kojima uobičajeno dolazi do pojave rezonancije [19]	28
Slika 6.	Dijagram procesa mjerenja i analize vibracija [18]	29
Slika 7.	Primjer ispravnog i neispravnog postavljanja akcelerometra [21].....	31
Slika 8.	Magnetsko postolje mora biti postavljeno na jednoliku površinu [21].....	32
Slika 9.	Primjer ispravne orijentacije akcelerometra [21].....	33
Slika 10.	Težina akcelerometra mora biti znatno manja od težine ispitivanog uređaja [21]	34
Slika 11.	Pogrešan i pravilan način postavljanja akcelerometra [21].....	34
Slika 12.	Schenck Vibrotest 60 ručni uređaj za mjerenje vibracija.....	35
Slika 13.	Gornja strana računala Raspberry Pi 2	38
Slika 14.	Donja strana računala Raspberry Pi 2	38
Slika 15.	Raspberry Pi 2 sa priključenim svim perifernim jedinicama, Ethernet kabelom i napajanjem	42
Slika 16.	Prozor s popisom operativnih sustava koje je moguće instalirati	43
Slika 17.	Prozor s izbornikom za konfiguraciju	43
Slika 18.	GY-521 modul s MPU-6050 digitalnim akcelerometrom.....	45
Slika 19.	Brojevi korištenih izvoda GPIO-a.....	48
Slika 20.	Prikaz ispravnog spajanja senzora na izvode računala.....	48
Slika 21.	Uređaj za simulaciju vibracija na koji je pričvršćen akcelerometar.....	53
Slika 22.	Orijentacija osi akcelerometra.....	53
Slika 23.	Prikaz dijela sadržaja datoteke mjerenja vibracija	54
Slika 24.	Grafički prikaz izmjerenih podataka o vibracijama u smjeru svih osi s rezultantom u vremenskoj domeni	56
Slika 25.	Grafički prikaz podataka o rezultatnim vibracijama u vremenskoj domeni	56
Slika 26.	Frekvencijski spektar rezultatnih vibracija pri maksimalnoj brzini vrtnje.....	56
Slika 27.	Frekvencijski spektar vibracija u smjeru osi X	57
Slika 28.	Frekvencijski spektar vibracija u smjeru osi Y	57
Slika 29.	Frekvencijski spektar vibracija u smjeru osi Z.....	57
Slika 30.	Frekvencijski spektar rezultatnih vibracija.....	58
Slika 31.	Tipičan troosni spektar neuravnoteženog stroja [34]	58
Slika 32.	Procjena vibracijskog stanja sustava prema ISO 7919 [35].....	59
Slika 33.	Brzina vibracija dobivena za maksimalnu rezultatnu vrijednost akceleracije [36]	60

POPIS TABLICA

Tablica 1.	Popis pet LED dioda za prikaz stanja.....	41
Tablica 2.	Registri senzora korišteni u projektu.....	45

POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE

Kod programa za mjerenje vibracija napisanog u Pythonu..... 49

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
IoT	-	Internet of Things
RFID	-	Radio-frequency identification
IPv6	-	Internet Protocol version 6
M2M	-	Machine to Machine
P2P	-	Peer to Peer
WAN	-	Wide Area Network
DBaaS	-	Database-as-a-Service
PLC	-	Programmable Logic Controller
MRP	-	Material Requirements Planning
MRP II	-	Manufacturing Resource Planning
MES	-	Manufacturing Execution System
HVAC	-	heating, ventilating, and air conditioning
ERP	-	Enterprise Resource Planning
OEM	-	Original Equipment Manufacturer
CMMS	-	Computerized Maintenance Management System
FFT	-	Fast Fourier Transform
HFD	-	High Frequency Detection
HFRD	-	High Frequency Resonance Demodulation
GPIO	-	General Purpose Input/Output
CSI	-	Camera Serial Interface
HDMI	-	High-Definition Multimedia Interface
DSI	-	Display Serial Interface
NOOBS	-	New Out Of the Box Software
MEMS	-	Micro Electro-Mechanical Systems
SPI	-	Serial Peripheral Interface
I ² C	-	Inter-Integrated Circuit
CPB	-	Constant Percentage Bandwidth
DPM	-	Digital Motion Processor
SPI	-	Serial Peripheral Interface
ADC	-	Analog-to-digital converter
FIFO	-	first in first out
RMS	-	Root Mean Square
g	m/s ²	akceleracija sile teže (9,81 m/s ²)
V	m/s	brzina
A	m/s ²	akceleracija
F	Hz	frekvencija

SAŽETAK

Internet objekata, kao koncept, postoji već duže vrijeme, no tek je u zadnjih nekoliko godina došlo do porasta primjene ove tehnologije. Razlog tome je napredak komunikacijske i tehnologije proizvodnje poluvodiča, koja omogućava izradu sve moćnijih računala, uz njihove sve manje dimenzije, energetske potrebe i cijenu. Mogućnosti primjene interneta objekata vrlo su široke te među ostalima uključuju primjene u potrošačkoj elektronici, proizvodnji i održavanju. Upravo održavanje predstavlja značajan udio u troškovima mnogih organizacija, a internet objekata može igrati važnu ulogu u njihovom smanjenju.

Radi boljeg razumijevanja problematike koja se obrađuje u radu, opisana je pojava vibracija na strojnoj opremi. Vibracije na strojnoj opremi su najčešće nepoželjne te mogu biti i pokazatelj i uzrok problema. Upravo zato, opisano je kako dolazi do njihove pojave, koje su im glavne karakteristike te kako se provodi njihovo mjerenje i analiza. Posebna pažnja posvećena je parametrima mjerenja i smjernicama kojih se treba pridržavati. Također, prikazana su postojeća rješenja u području mjerenja vibracija, koja obično imaju visoku cijenu i često se ne uklapaju u koncept interneta objekata.

Kao moguće rješenje naveden je sustava za mjerenje vibracija koji koristi računalo Raspberry Pi 2 i digitalni akcelerometar. Prednost ovakvog sustava je znatno niža cijena te mnogo veća fleksibilnost i mobilnost u odnosu na postojeća, komercijalna rješenja, uz podjednaku razinu preciznosti i pouzdanosti. S druge strane, za prikupljanje željenih podataka, ovakav sustav potrebo je programirati te je potrebno provesti analizu dobivenih podataka kako bi se dobile željene informacije.

U radu je prikazan i objašnjen cjelokupan postupak pripreme i korištenja sustava za mjerenje vibracija, od instalacije operativnog sustava na računalo do izrade programa i provedbe prikupljanja podataka. Uz to, navedene su i prikazane mogućnosti analize dobivenih podataka te zaključci do kojih se može doći temeljem analize.

Ključne riječi: Internet objekata; održavanje; vibracije; Raspberry Pi2;

SUMMARY

As a concept, Internet of Things has been around for a number of years, but its expansion has only started a few years ago. The reason for this are the advances in the communication and semi-conductor manufacturing technologies. These technologies enable the production of more powerful devices, while reducing their size, energy consumption and price. There are many possible applications of Internet of Things, including consumer electronics, manufacturing and maintenance. Often, maintenance represents a significant part of the overall costs for an organisation and Internet of Things can help reduce them.

Machine vibrations are described in order to better understand the effect they have on equipment. Machine vibrations are mostly unwanted and can, at the same time, be the sign and the cause of a problem. That is why their cause and main characteristics are described, as well as their measurement and analysis. Special attention is paid to the measurement parameters and the guidelines that need to be followed. Also, some existing solutions are presented, that usually have a high price and often do not fit into the concept of Internet of Things.

A possible solution is given in the form of a vibration measurement system that uses Raspberry Pi 2 and a digital accelerometer. This system has a considerably lower price and a much greater flexibility and mobility compared to the existing, commercial solutions, while maintaining roughly the same level of accuracy and reliability. On the other hand, in order to collect the data, a system like this needs to be programmed and it is necessary to analyze the gathered data in order to gain information.

This paper presents the entire set up and use procedure of the vibration measurement system, from installation of the operating system to coding and data gathering. Also, some options for analysis of the gathered data are listed and shown, as well as the conclusions that can be derived from their analysis.

Key words: Internet of Things; maintenance; vibrations; Raspberry Pi2;

1. UVOD

U današnje vrijeme, broj korisnika Interneta kontinuirano se povećava te je život bez njega postao nezamisliv. Internet je, između ostaloga, omogućio brži i efikasniji prijenos podataka, povezivanje ljudi te stvaranje novih poslovnih modela. Internet je također, zajedno sa razvojem tehnologije poluvodiča i komunikacijske tehnologija, omogućio povezivanje fizičkih objekata u koje su ugrađeni senzori, programi i mogućnost povezivanja, što se naziva Internet objekata. Ovaj koncept omogućava prikupljanje podataka i upravljanje fizičkim objektima iz daljine, korištenjem postojeće mrežne infrastrukture, čime se ostvaruje bolja integracija fizičkog svijeta i računalnih sustava. U konačnici, ovim pristupom ostvaruje se povećana učinkovitost, preciznost i smanjenje troškova. Prednosti korištenja Interneta objekata u području održavanja su očite jer eliminiraju potrebu za fizičkim obilaskom i nadzorom opreme, nego se sve potrebne informacije dobivaju pravovremeno, na mjestu gdje se donose odluke. Ovime se štedi vrijeme i novac, pogotovo u slučaju opreme koja je smještena na geografski širokom području. Također, velika količina podataka prikupljenih sa različitih objekata omogućava njihovu obradu metodama rudarenja podataka, čime se omogućava predviđanje ponašanja pojedinih dijelova opreme.

U ovom radu, cilj je izraditi pouzdan i jeftin sustav za prikupljanje podataka o vibracijama, koje su jedan od najvažnijih pokazatelja stanja opreme, korištenjem koncepta Interneta objekata.

U drugom poglavlju je općenito obrađena tematika Interneta objekata. Poseban naglasak je stavljen na činjenicu da je tehnologija trenutno u fazi eksponencijalnog rasta te da još nije dosegla točku infleksije. Također, naglasak je stavljen na mnogobrojne aplikacije tehnologije, postojeće i buduće, kao i na potencijal za razvoj novih poslovnih modela i povećanje prihoda u različitim industrijama, koje nudi ova tehnologija. Uz to, naglasak je stavljen i na gotovo neraskidivu povezanost tehnologija Interneta objekata i Big Data, tj. na mogućnosti analitike velike količine prikupljenih podataka.

U trećem poglavlju obrađena je tematika vibracija industrijske opreme, njihovi uzroci, vrste i načini mjerenja. Naglasak je stavljen na akcelerometar, kao vrstu senzora koji se najčešće upotrebljava za mjerenje vibracija te na opće smjernice kojih se treba pridržavati prilikom prikupljanja podataka o vibracijama. Ove informacije su korištene pri izradi samog sustava za mjerenje vibracija. Također, ukratko je opisan proces analize podataka o vibracijama te uređaji koji su trenutno dostupni.

U četvrtom poglavlju opisan je način izrade i programiranja sustava za mjerenje vibracija koji koristi računalo Raspberry Pi 2 i akcelerometar. Detaljno su opisani dijelovi računala te način njegove pripreme za rad, kao i akcelerometar korišten u konkretnom sustavu. Zatim je opisan način povezivanja računala i senzora te je objašnjen programski kod kojim se prikupljaju podaci. Također, prikazani su rezultati mjerenja i opisane su mogućnosti analize prikupljenih podataka.

Zaključak je dan kao peto poglavlje i u njemu su prikazani zaključci na temelju izrade sustava za mjerenje vibracija i dobivenih rezultata, kao i osvrt na cjelokupan rad.

2. INTERNET OBJEKATA

Broj korisnika Interneta se kontinuirano povećava tijekom godina te je krajem 2014. godine taj broj dosegao gotovo 3 milijarde. Većina ljudi Internet koristi za pretraživanje, zabavu, društvene mreže i kupovinu, no uzimajući u obzir da je izgradnja infrastrukture koja omogućava pristup Internetu vrlo skupa, bilo bi pametno iskoristiti je i za druge primjene. Jedna od njih je i korištenje Interneta za prijenos podataka prikupljenih pomoću senzora rasprostranjenih na širokom području, kao što su primjerice senzori okolišnih parametara. Tome u prilog svakako ide i činjenica da širokopojasni Internet postaje dostupan sve većem broju ljudi, izrađuje se sve više uređaja s ugrađenim Wi-Fi-em i sensorima, snižavaju se troškovi tehnologije te se ubrzano povećava broj korisnika smartphone-a.

Internet objekata se odnosi na fizičke objekte povezane preko ugrađenih senzora i ostalih uređaja koji mogu prikupljati i preko Interneta prenositi informacije o objektima. Podaci prikupljeni pomoću ovih uređaja mogu se zatim analizirati kako bi se optimizirali proizvodi, usluge i operacije. Jedna od možda najranijih i najpoznatijih primjena ove tehnologije bila je u području optimizacije proizvodnje energije: senzori raspoređeni unutar električne mreže mogli su pomoći poduzećima koja pružaju javne usluge da iz daljine nadziru korištenje energije te prilagode njenu proizvodnju i raspodjelu za vrijeme najveće ili najmanje potrošnje. No, ova tehnologija se primjenjuje i u brojnim drugim industrijama. Neka osiguravajuća društva, primjerice, sada nude pakete koji od vozača zahtijevaju da ugradi senzor u svoj automobil, što omogućava osiguravatelju da premije temelji na stvarnom ponašanju tijekom vožnje, a ne na projekcijama. Također, liječnici mogu koristiti informacije prikupljene pomoću bežičnih senzora u domovima svojih pacijenata kako bi poboljšali liječenje kroničnih bolesti. Prema McKinsey Global Institute, korištenjem kontinuiranog nadzora umjesto periodičkih testiranja, liječnici su mogli smanjiti troškove liječenja za između 10 i 20%, što znači da je samo na liječenju kongestivnog zatajenja srca moguće uštedjeti milijarde dolara. Primjere korištenja Interneta objekata možemo pronaći i u svakodnevnom životu. Recimo da vas budilica probudi u 6 sati ujutro te zatim obavijesti aparat za kavu da počne kuhati kavu. Ili recimo da vaša uredska oprema zna da joj ponestaje zaliha i automatski naruči dodatne. Drugim riječima, u budućnosti, sve što je moguće povezati, bit će povezano. To uključuje mobilne uređaje, aparate za kavu, perilice rublja, slušalice, svjetiljke, uređaje u odjeći i gotovo sve ostalo. Zapravo, broj mogućih primjena ove tehnologije toliko je velik da Internet objekata ima potencijal zamijeniti ljude kao najveći korisnik i proizvođač informacija na Internetu.

Pojam Internet objekata (eng. *Internet of Things*, skr. IoT) prvi je predložio Kevin Ashton 1999. godine, tijekom rada u AutoID laboratoriju na MIT-u. Ashton je došao na ideju dok je istraživao na koji način bi tvrtka za proizvodnju robe široke potrošnje, Proctor & Gamble, mogla unaprijediti poslovanje povezivanjem RFID (eng. *Radio-frequency identification*) informacija na Internet. Uz Internet objekata, koriste se i drugi pojmovi istog ili sličnog značenja: *komunikacija među uređajima* (eng. *Machine-to-Machine communication*, skr. M2M), *sveprisutno računanje*, *ugrađeno računanje*, *sveobuhvatno računanje*, *pametne usluge* itd.

Trenutno, Internet objekata možemo lako usporediti sa poznatom vizijom Billa Gatesa iz 1977. godine o „računalu na svakom stolu i u svakom domu“ te sa ranijim poimanjem računala kao užasno skupim i specijaliziranim uređajima, dostupnim samo sveučilištima, nekim globalnim kompanijama orijentiranim budućnosti i vojsci. Razlog tome je što eksponencijalni rast često u početku izgleda kao linearan pa je u početnim stadijima nekog projekta teško odrediti da li će projekt ostvariti eksponencijalan rast ili ne. Prema istraživanju provedenom 2014. godine među rukovoditeljima najvećih svjetskih proizvođača poluvodiča, od Interneta objekata se očekuje da bude njihov najveći izvor rasta u idućih nekoliko godina, veći čak i od trendova kao što su bežično računalstvo i „Big Data“. Istraživanje provedeno od strane McKinsey Global Institute-a podupire ovakva očekivanja jer se očekuje da će utjecaj Interneta objekata na globalnu ekonomiju do 2025. godine iznositi čak 6.2 bilijuna dolara godišnje [1]. Uz to, očekuje se da će broj priključenih uređaja do 2020. godine iznositi između 20 i 30 milijardi. Mnogi od tih uređaja vjerojatno će biti ugrađeni elektronički mjerni uređaji: termostati, manometri, uređaji za otkrivanje onečišćenja, senzori glukoze, EKG-i, elektroencefalogrami itd. Ovi uređaji će ispitivati i nadzirati gradove, ugrožene vrste, atmosferu, brodove, autoceste, kamione, naše razgovore, naša tijela pa čak i naše snove.

Internet objekata također nudi i mnoge izazove. Zasiurno najveći je kako osigurati sigurnost, privatnost i dijeljenje podataka u situaciji kada imamo milijarde uređaja koji su međusobno povezani. Ovaj problem postoji već i danas, uz mnogo manji broj povezanih uređaja. Još jedan problem, s kojim će se suočiti mnoga poduzeća, je i pohrana, praćenje, analiza i dolazak do zaključaka na temelju ogromnih količina prikupljenih podataka.

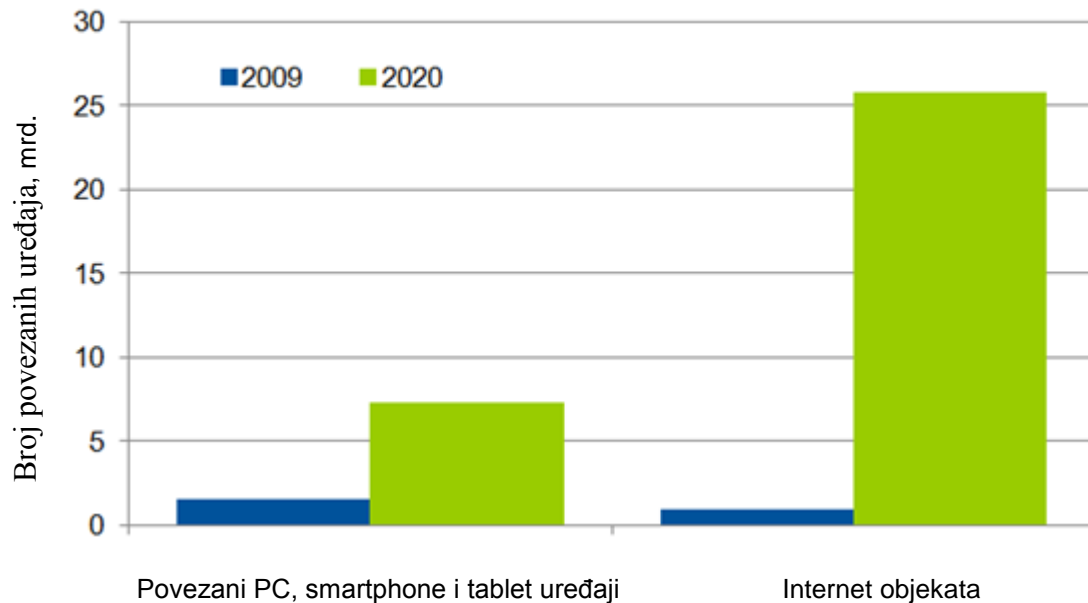
Ipak, stvarnost je da Internet objekata omogućava praktički nebrojene prilike i načine povezivanja, od kojih mnoge još ne možemo niti zamisliti ili razumjeti utjecaj koji će imati u budućnosti.

2.1. Potencijal tehnologije Interneta objekata

Prema istraživanju tvrtke Gartner, Inc. Internet of Things će značajno promijeniti tehnološko tržište. Njihova procjena je da će ulaganje u IT u Europi, Srednjem istoku i Africi (EMEA) imati godišnju stopu rasta od 2.2 posto do 2017. godine, dok će, istovremeno, Internet objekata stvarati nova tržišta i novu ekonomiju. Isto tako, procjena je da tradicionalno IT tržište neće tako skoro, ako ikada, rasti po većoj stopi, nego da će rast doći od strane netradicionalnih IT tržišta. U 2015. godini, IT i telekomunikacijsko tržište zajedno će dosegnuti veličinu od gotovo 4 bilijuna dolara, dok se procjenjuje da će prihodi dobavljača Interneta objekata postupno dosegnuti 309 milijardi dolara godišnje do 2020. godine. Polovica ove aktivnosti će biti novi start-up-ovi te će 80% biti u uslugama, a ne proizvodima [2].

2009. godine, u svijetu je bilo 2.5 milijardi priključenih uređaja, uglavnom mobilnih telefona, PC-a i tableta. 2020. godine, procjenjuje se da će u svijetu biti preko 30 milijardi priključenih uređaja, uz puno veću raznolikost (Slika 1). Od toga će u uporabi biti 26 milijardi pametnih, povezanih proizvoda. To je u prosjeku 3.3 uređaja po osobi, ne računajući 7.3 milijarde dostupnih smartphone-a i tableta. Kao što je već spomenuto, McKinsey Global Institute smatra da Internet objekata ima potencijal da upihodi 6.2 bilijuna dolara godišnje u novoj globalnoj ekonomskoj vrijednosti do 2025. godine. Isto tako, u istom izvještaju predviđa se da će do tada 80 do 100 posto svih proizvođača koristiti aplikacije Interneta objekata, što će dovesti do potencijalnog ekonomskog utjecaja na globalnu proizvodnu industriju od 2.3 bilijuna dolara. Razlog tome nije samo potražnja za novim proizvodima, nego i činjenica da Internet objekata također omogućava smanjenje pa čak i potpunu eliminaciju zastoja u proizvodnim pogonima, uzrokovanih nedostatkom informacija, kašnjenjem informacija ili radovima na održavanju strojeva. Na ovaj način, proizvođači mogu svesti pogreške na minimum, biti fleksibilniji s naknadnim promjenama te ubrzati dovođenje novih proizvoda na tržište.

Internet objekata omogućava rješenja koja su optimizirana za klijenta te omogućava inovativne, nove poslovne modele, čime se stvara povećana ekonomska vrijednost za sve organizacije i globalnu ekonomiju. Predviđa se da će ukupna dodana ekonomska vrijednost od strane Interneta objekata, u različitim industrijama, biti 1.9 bilijuna dolara u 2020. godini. Industrijske grane koje predvode u usvajanju Interneta objekata su proizvodnja (15%), zdravstvo (15%) i osiguranje (11%).



Slika 1. Broj uređaja priključenih na Internet, u milijardama [2]

U posljednjih nekoliko godina, prevladane su mnoge prepreke koje su ranije stajale na putu digitalizacije i razvoja Interneta objekata. Veličina i cijena bežičnih uređaja su se značajno smanjile. Protokoli kao što je IPv6 omogućuju pridavanje komunikacijskih adresa milijardama uređaja. Elektroničke tvrtke ugrađuju Wi-Fi i mobilnu povezanost u široki spektar uređaja. Dostupnost mobilnih podataka je znatno unaprijeđena sa mnogim širokopojsnim mrežama koje nude velike brzine. Iako još nije usavršena, tehnologija baterija je unaprijeđena te je u mnoge uređaje ugrađeno solarno punjenje baterija. Razvoj svih navedenih područja omogućava barem tri prednosti Interneta objekata koje će iskusiti svako poduzeće koje ga implementira: poboljšanu komunikaciju, kontrolu i automatizaciju te uštede.

Poboljšana komunikacija se ostvaruje tako što Internet objekata prenosi informacije o ljudima i sustavima, kao što je stanje opreme i vitalni znakovi čovjeka. U većini slučajeva, ranije su se ove informacije prikupljale ručno i neredovito. Primjerice, gotovo svako poduzeće ima potrebu za praćenjem stvari i ljudi. U transportnoj industriji, poduzeće može omogućiti praćenje i uvid u stanje paketa i pošiljaka u realnom vremenu. Transportna kompanija Maersk, recimo, može koristiti senzore za praćenje lokacije i temperature klimatiziranih kontejnera.

Isto tako, kontrola i automatizacija znači da u povezanom svijetu, ne samo da su dostupni podaci o stanju uređaja, nego je često moguće i upravljati uređajem iz daljine. Primjerice, moguće je iz daljine pokrenuti ili zaustaviti rad nekog uređaja ili prilagoditi temperaturu u klimatiziranoj prostoriji. Isto tako, jednom kada se ustanovi normalno stanje neke

opreme, moguće je ostvariti da sustav upozori na nepravilnosti i automatski na njih odgovori. Recimo, ako će čeljusti kočnica na kamionu uskoro prestati raditi, sustav može upozoriti poduzeće da ne koristi kamion i automatski zakazati održavanje.

Poduzeća koja se bave proizvodnjom gube novac kada strojevi zakažu. Internet objekata omogućava uštede jer pomaže poduzećima tako što minimizira zastoj strojeva i omogućava izvođenje planiranih radova održavanja, obzirom da mjerenja koja provode senzori daju informacije o stvarnom stanju opreme, a ne samo procjene [3].

Digitalizacija obuhvaća i mijenja cijelu organizaciju, bez obzira na proizvod ili uslugu koju ona pruža. Smatra se da će Internet objekata promijeniti industrije na tri razine: na razini poslovnih procesa, poslovnih modela i poslovnog trenutka.

Na prvoj razini, digitalna tehnologija poboljšava naše proizvode, usluge i procese, naša korisnička iskustva te načina na koji radimo unutar naših organizacija i partnerstava. Drugim riječima, radimo ono što i inače radimo, no digitalizacija nam omogućava da to radimo bolje ili da razvijemo bolje proizvode unutar naše industrije.

Kako poduzeća digitaliziraju proizvode i procese, iz toga proizlaze potpuno novi načini poslovanja u industriji, tj. događaju se transformacijske promjene jer digitalizacija mijenja industrije na razini poslovnog modela. Jedan od takvih primjera je proizvođač sportske opreme Nike, koji trenutno gotovo ulazi u zdravstvenu industriju sa svojom povezanom sportskom odjećom i opremom, kao i Google, sa svojim autonomnim vozilom. Činjenica je da se navedena poduzeća ne bi trebala niti nalaziti u spomenutim industrijama, a danas predvode promjene u njima.

Treća razina promjene uslijed digitalizacije postoji zbog potrebe za natjecanjem s još nezabilježenom brzinom poslovanja, tj. brzinom novca, fleksibilnošću i sposobnošću za brzom promjenom. Dobar primjer za to su veliki lanci hotela kao što su Starwood, Hilton i Hyatt, koji se još uvijek natječu protiv prvog vala digitalnih poslovnih modela i ere e-trgovina, kao što je Hotels.com. No, novi digitalni poslovni modeli, stvoreni od strane poduzeća kao što je AirBnB, zahtijevaju od navedenih lanaca hotela da se natječu i protiv sve većeg broja smještaja, ne u drugim hotelima, nego u domovima samih klijenata. Ponuđači i vrsta smještaja mijenjaju se svakodnevno, čime se stvara natjecanje na razini poslovnog trenutka [2].

Internet objekata će stvoriti desetke milijuna novih objekata i senzora, koji će generirati podatke u realnom vremenu. Podaci u današnje vrijeme predstavljaju imovinu, tako da će poduzeća trebati Big Data tehnologiju, kao i tehnologije za pohranu kako bi prikupile,

analizirale i pohranile tako veliku količinu informacija. Uz to, da bi se podaci pretvorili u novac, potrebno je donositi odluke. Pošto rukovoditelji neće imati vremena ni kapacitet da sami donose odluke, bit će im potrebna računalna obrada podataka. Računala mogu donijeti sofisticirane odluke na temelju podataka i znanja te mogu komunicirati te odluke na našem jeziku, a za uspjeh u digitalnom svijetu, nužno je računalima prepustiti donošenje odluka.

Iz svega navedenog, vidljivo je da je Internet objekata strateški vrlo važno tržište koje će imati ubrzani rast te će doprinijeti povećanju prihoda i smanjenju troškova u poduzećima.

2.2. Internet objekata i Big Data

Internet objekata i Big Data su usko povezani jer će milijarde uređaja povezanih preko Interneta stvarati ogromne količine podataka. No, to samo po sebi neće dovesti do nove industrijske revolucije ili promijeniti naš svakodnevni život. Činjenica je da prikupljeni podaci postaju korisni samo ako im se može lako pristupiti, dostupni su u realnom vremenu, imaju utjecaj na značajan dio organizacije te uz prikladnu analizu, mogu dovesti do značajnih promjena za organizaciju. Upravo iz ovih razloga koristi se Big Data, tj. tehnologija koja omogućuje efikasnu obradu i analizu ogromnih količina podataka u razumnom vremenskom periodu. Big Data karakteriziraju velik volumen i raznolikost podataka, velika brzina prikupljanja podataka i njihovo upitno podrijetlo. Drugim riječima, podaci se prikupljaju u velikim količinama, uz veliku raznolikost, tj. mješavinu strukturiranih i nestrukturiranih podataka, imaju veliku brzinu dolaska, često u realnom vremenu, uz neprovjeren izvor tih podataka. Također, ovakvi podaci su neprikladni za obradu korištenjem tradicionalnih SQL relacijskih baza podataka, temeljenih na upitima. Iz tog razloga, odnedavno se razvijaju alternativni alati, primjerice Apache-ov sustav za obradu raspodijeljenih podataka otvorenog koda, Hadoop, kao i različite NoSQL baze podataka te platforme za poslovnu inteligenciju.

Količina podataka postaje sve veća i bez Interneta objekata. Procjenjuje se da će se ukupni broj podataka koji se godišnje stvore, repliciraju i iskoriste udvostručiti svake dvije godine pa će tako do 2020. godine doseći 44 zetabajta (ZB), tj. 44 milijardi terabajta [4]. Prema podacima iz 2013. godine, ukupno je u svijetu bilo proizvedeno 4.4 ZB podataka, od čega se procjenjuje da su 2.9 ZB stvorili korisnici, a 1.5 ZB tvrtke. No, samo 15% (0.6 ZB) korisničkih podataka nije na neki način bilo povezano s tvrtkama, što znači da su tvrtke odgovorne za proizvodnju velike većine podataka u svijetu (oko 3.8 ZB u 2013. godini). Na sreću za tvrtke, procjenjuje se da udio korisnih podataka, tj. onih koji mogu dovesti do poboljšanja poslovanja, iznosi samo 1.5 posto. S druge strane, Cisco-va procjena o količini podataka stvorenih od strane uređaja koji koriste Internet objekata, koja uključuje veze čovjek-čovjek (P2P), stroj-čovjek (M2P) i stroj-stroj (M2M), do 2018. godine iznosi 403 ZB, što je 47 puta više od procijenjenog ukupnog prometa podatkovnih centara.

No, smatra se da će većina podataka prikupljenih pomoću Interneta objekata zapravo biti maleni skupovi podataka, tzv. „Small Data“. Small Data je skup podataka koji sadrži vrlo specifična svojstva te se koristi za određivanje trenutnih stanja. Primjer takvih podataka je lokacija, temperatura, vlaga, tlak, vibracije, je li stroj uključen itd. Riječ je o podacima sa

senzora, koji se prikupljaju u realnom vremenu te zatim ulaze u velike skupove podataka kako bi se dobio povijesni pregled i mogućnost prepoznavanja trendova. Maleni skupovi podataka su važni jer mogu pokrenuti događaje koji se temelje na trenutnom stanju. Ti događaji mogu biti povezani s informacijama o ponašanju i trendovima, temeljenim na velikim skupovima podataka, a dobivenim pomoću algoritama za strojno učenje. Primjerice, na vjetroturbinu su ugrađeni različiti senzori koji određuju smjer vjetra, brzinu, temperaturu, vibracije i ostala relevantna svojstva. Temeljem informacija koje, u realnom vremenu, daje Small Data, moguće je programirati automatsku prilagodbu lopatica turbine promjenjivim uvjetima. Ovakvi mali skupovi podataka također ulaze i u velike skupove podataka, gdje algoritmi za strojno učenje počinju prepoznavati obrasce. Pomoću obrazaca, moguće je otkriti kako različiti uvjeti vjetra i vremena utječu na trošenje različitih komponenata te koliki je očekivani životni vijek određenog dijela. Drugim riječima, Small Data zna što promatrani objekt radi, dok Big Data razumije zašto objekt to radi. Dakle, Big Data nije nužan za sve primjene Interneta objekata jer je često dovoljno poznavanje trenutnog stanja i nekoliko svojstava kako bi se pokrenuo određeni događaj. Isto tako, obrada malenih skupova podataka je mnogo jeftinija od obrade velikih skupova pa ovakvim optimiziranjem poslovnih procesa tvrtke mogu uštediti milijune dolara [5].

Trenutno, za obradu podataka dobivenih Internetom objekata, a korištenjem Big Data tehnologije postoje neka ograničenja. Najveće je svakako trenutni nedostatak standarda, jer da bi Internet objekata radio kako je zamišljeno, mora postojati okvir unutar kojeg uređaji i aplikacije mogu sigurno razmjenjivati podatke preko mreža. Da bi se to ostvarilo, potrebno je stvoriti zajedničku platformu koja objedinjuje sve povezane objekte i omogućava međusobnu suradnju različitim industrijama i aplikacijama.

Drugi nedostatak je sigurnosti i privatnosti koji predstavljaju velik problem za Internet objekata i Big Dana, unatoč razvoju standarda koji će zasigurno pridonijeti njihovom poboljšanju, pogotovo u područjima kao što su zdravstvo i ključna nacionalna infrastruktura. Sigurnost je posebno problematična kod Interneta objekata zbog širokog područja primjene, od kojih svaki ima vlastite zahtjeve za sigurnošću: za telekomunikacijsku industriju to je dostupnost, za organizacije s klijentima to je zaštita podataka, dok za pružatelje M2M i IoT usluga, sigurnost znači osiguranje neprekidnog rada. Velika raznolikost te različite mogućnosti i primjene uređaja koji koriste Internet objekata, čine sigurnost posebno teškim zahtjevom u industriji Interneta objekata.

Isto tako, ogromne količine podataka koje će generirati uređaji koji koriste Internet objekata će staviti mreže i infrastrukturu podatkovnih centara pod veliki pritisak. Tokovi podataka Interneta objekata će najviše dolaziti iz senzora i aplikacija te će njihov dolazak biti u rasponu od kontinuiranog do skokovitog, ovisno o području primjene. Prema istraživanju konzultantske tvrtke Gartner, zbog velikog broja priključaka na mrežu vezanih za Internet objekata i veliki volumeni podataka, vjerojatno najbolje rješenje će biti raspodijeljeno upravljanje podatkovnim centrima, uz više manjih podatkovnih centara koji provode početnu obradu te relevantne podatke preko WAN-a prosljeđuju glavnom podatkovnom centru za daljnju analizu i obradu. No, ovo rješenje će dovesti i do dodatnih problema vezanih za pohranu pomoćnih podataka, propusnost mreže i planiranje kapaciteta podatkovnog centra. Uz to, volumen, brzina, raznolikost i raznolika kvaliteta podataka dobivenih pomoću Interneta objekata jako otežavaju izradu softvera za analizu koji može donijeti informacije korisne za poslovanje.

Jedno od većih ograničenja je također i nedostatak zaposlenika s odgovarajućim znanjem i vještinama. Tvrtkama će, zbog preklapanja Interneta objekata i Big Data, biti potrebni zaposlenici s multidisciplinarnim znanjima i vještinama, ukoliko žele izvući najveću moguću vrijednost iz tih tehnologija. Postojat će potražnja za dvije vrste zaposlenika: poslovni analitičari, koji mogu postaviti prava pitanja za dostupne podatke i rezultate predstaviti donositeljima odluka te znanstvenici specijalizirani za podatke, koji mogu izraditi alate za analizu i eliminirati nekvalitetne podatke [4].

Treba naglasiti i kako bi poduzeća, zbog velike količine podataka, trebala prestati koristiti vlastite podatkovne centre i obradu podataka prepustiti pružateljima usluga u cloud-u. Većina poduzeća nema dostatnu infrastrukturu te ukoliko bi se upustila u samostalnu obradu podataka dobivenih Internetom objekata, morala bi prebaciti fokus i resurse s temeljne djelatnosti, na prikupljanje, pohranu i analizu podataka. To bi bio jedini način da osiguraju potrebnu propusnost, kapacitet za pohranu i snagu računala, potrebne za unos, pohranu i analizu tako velike količine podataka u realnom vremenu. Stručnjaci procjenjuju da preko polovice svih Big Data projekata propada još u fazi prikupljanja podataka. Čak i da poduzeće uspješno provede prikupljanje podataka, pohrana tih podataka predstavlja veliki izazov. Zaposlenici poduzeća morali bi naučiti raditi s novim tehnologijama kao što je Hadoop, Map Reduce itd. te omogućiti dovoljan kapacitet hard diskova, mreže i računala kako bi mogli pratiti priljev novih podataka. No, čak i u slučaju da poduzeće uspije prevladati sve prepreke, pravi problemi tek počinju u fazi analize podataka. Za početak, bilo bi potrebno integrirati podatke dobivene

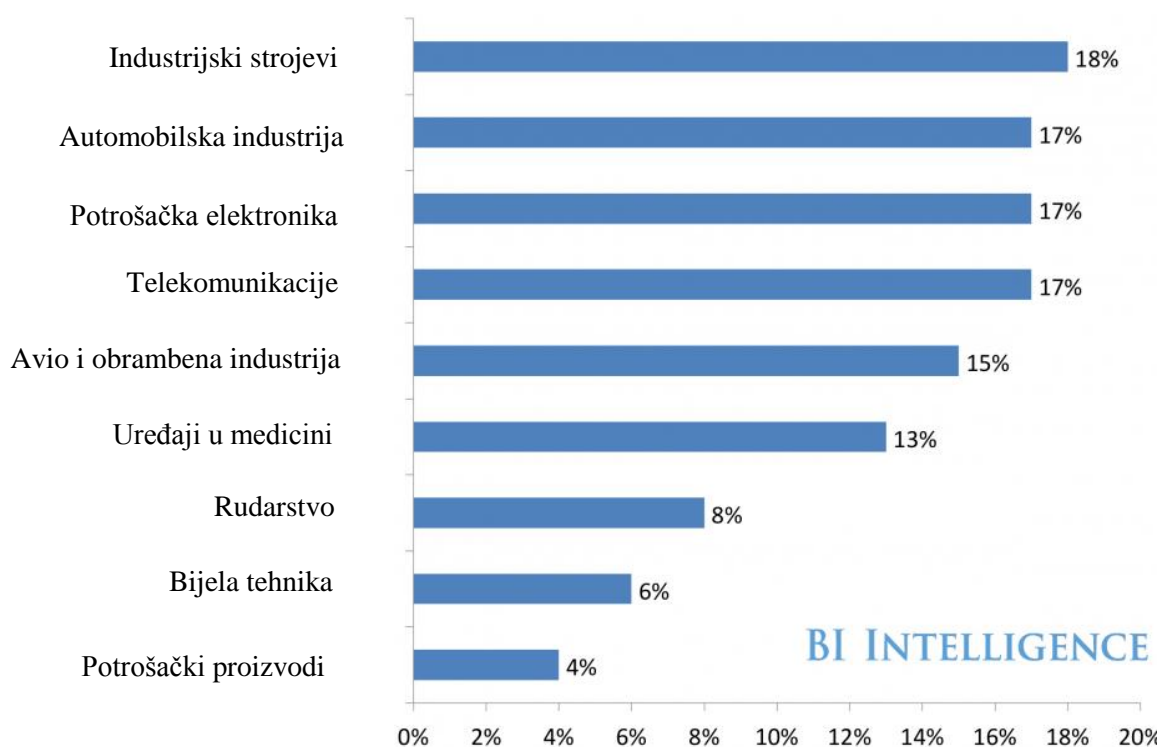
Internetom objekata u postojeću bazu podataka, što je iznimno teško jer su osnovne tehnologije za klasične baze podataka različite od onih za Big Data. Uz to, u pravilan rad ovakvog sustava moralo bi biti uloženo mnogo novaca i truda jer, vrlo vjerojatno, infrastruktura koja postoji u većini podatkovnih centara ne bi bila dostatna za rad s količinama podataka koje proizlaze iz Interneta objekata. Prema tome, za većinu poduzeća, uradi-sam nije najbolje rješenje.

Umjesto toga, jedno od trenutno najpopularnijih rješenja je korištenje jedne od mnogih usluga baze podataka (eng. *Database-as-a-Service*, skr. DBaaS) na tržištu. Rješenja kao što je Amazon-ov Redshift, Hortonworsk Enterprise-ov Hadoop i Cloudera Enterprise pružaju usluge automatizacije i upravljanja bazama podataka kako klijenti ne bi morali sami instalirati i upravljati osnovnim tehnologijama potrebnim za NoSQL baze podataka. Ovakvo rješenje uklanja mnoge komplikacije pa se inženjeri u poduzeću mogu fokusirati na same podatke, umjesto na tehnologije potrebne za rad baze podataka. S druge strane, problem je u tome što do podataka ne može doći bilo tko, nego su poduzeću, za dobivanje informacija i postavljanje pravih upita, potrebni inženjeri.

Drugo rješenje je korištenje usluga upravljanja podacima, tj. upravljanja Big Data-om. Pružatelji usluga upravljanja podacima, kao što je Treasure Data, imaju obvezu preuzimanja podataka i upravljanja bazom podataka te omogućuju provođenje analize izvlačenjem skupova podataka. Na ovaj način, korisnici se mogu usredotočiti samo na analizu, dok sve ostalo rade kooperanti, tj. outsource-ano je. Na ovaj način, korisnici mogu brzo izaći na tržište, bez potrebe za velikim početnim investicijama [6].

2.3. Internet objekata u proizvodnji

Iako tvrtke koje se bave proizvodnjom već desetljećima u svojim pogonima primjenjuju senzore i automatizaciju, ti senzori, PLC-ovi i kontroleri temeljeni na PC-u, uglavnom nisu povezani s IT-em i operacijskim sustavima. Ovi sustavi su uglavnom organizirani na hijerarhijski način, s individualnim bazama podataka, ugrađenim velikim brojem zastarjelih komponenata te često nisu povezani s unutarnjim sustavima. Ovakva zastarjela struktura jako se razlikuje od otvorenih i Internetom povezanih mrežnih struktura, što proizvođačima predstavlja veliku prepreku u implementiranju IoT, Big Data i M2M tehnologija. Uz to, standardni industrijski senzori, kontroleri i mreže su vrlo skupi, što predstavlja dodatnu prepreku unaprjeđenju postojećih pogona za proizvodnju. S toga ne čudi da, prema istraživanju iz 2013. godine, samo 13 posto proizvođača u SAD-u koristi pametnu proizvodnju i uređaje temeljene na Internetu objekata. Na globalnoj razini, istraživanje iz iste godine pokazuje da implementaciju Interneta objekata predvode proizvođači industrijskih strojeva, s 18 posto, dok ih u stopu prate auto-industrija, industrija potrošačke i industrijske elektronike te telekomunikacijska industrija, sa 17 posto (Slika 2) [7].



Slika 2. Industrije koje predvode u uvođenju Interneta objekata u svojim pogonima [7]

Način proizvodnje sa sustavima koji omogućuju Internet objekata često se naziva Industrija 4.0. Smatra se da je Industrija 1.0 bio izum parnog stroja, čime je mehanička snaga zamijenila ljudsku, Industrija 2.0, čiji je začetnik bio Henry Ford, donijela je masovnu proizvodnju, dok je Industrija 3.0 u pogone dovela elektroniku i sustave za kontrolu. Temelj Industrije 4.0 i pametne proizvodnje je Internet objekata, tj. komunikacija između proizvoda, sustava i strojeva. Povezivanjem strojeva, proizvođač može stvoriti inteligentne mreže duž cijelog lanca dodane vrijednosti, koje međusobno komuniciraju i samostalno se kontroliraju, bez čestih intervencija operatera. Na ovaj način, primjerice, strojevi mogu predvidjeti otkaz i samostalno pokrenuti proces održavanja, umjesto da se oslanjaju na nepouzdan nadzor od strane zaposlenika zaduženih za održavanje. Internet objekata može nadzirati raspodjelu sirovina, stanje tekućina potrebnih za provedbu operacija, razinu istrošenosti alata itd. Isto tako, strojevi mogu sami organizirati logistiku kako bi reagirali na neočekivane promjene u proizvodnji, nedostatak materijala, zastoje i drugo. Prema tome, proizvođači mogu koristiti tehnologiju Interneta objekata kako bi dobili dinamične, učinkovite i automatizirane proizvodne procese.

Povezani senzori će omogućiti dosada nezabilježenu razinu preglednosti operacija koje se odvijaju u pogonu. Internet objekata unaprjeđuje proizvodnju tako što povezuje ljude s pravim informacijama, preko pravih uređaja te prelazi granice poduzeća tako što povezuje dobavljače, pružatelje usluga održavanja i distribucijske lance. Uz to, novi programi, pogodni za upotrebu na mobilnim uređajima, omogućit će upraviteljima pogona pristup podacima, kao što je učinkovitost opreme, učinkovitost linije, alatima za vizualizaciju podataka te obavijestima iz bilo koje lokacije, po mnogo manjoj cijeni nego prijašnji sustavi rađeni zasebno za svako poduzeće. Kako Internet objekata bude postajao sve zastupljeniji, povezivanje uređaja na operacijske i poslovne softvere omogućit će proizvođačima brži tok podataka, brže donošenje odluka i bržu reakciju na zahtjeve tržišta. Također, međusobnom komunikacijom strojeva (M2M) ostvarit će se nova razina automatizacije. Primjerice, proizvođač automobila GM koristi podatke prikupljene pomoću senzora kako bi odredio je li u pogonu za bojanje automobila prevelika vlaga. Ako sustav procijeni da uvjeti u pogonu nisu povoljni, automobil se odvede u drugi pogon za bojanje, što smanjuje potrebu za ponovnim bojanjem i omogućuje tvornici rad bez zastoja.

Tvrtke koje su uvele pametnu proizvodnju koriste analitiku kako bi donosile bolje odluke i učinkovitije provodile operacije. Internet objekata, Big Data i IP mreže pomažu proizvođačima da produlje životni vijek svoje imovine, dok istovremeno optimiziraju

učinkovitost i minimiziraju potrošnju energije. Isto tako, sustavi za pametnu proizvodnju povezuju proizvodno i poslovno područje, kao što su planiranje potreba za materijalom (eng. *Material requirements planning*, skr. MRP), planiranje resursa za proizvodnju (eng. *Manufacturing resource planning*, skr. MRP II) i sustavi za provedbu proizvodnje (eng. *Manufacturing Execution System*, skr. MES). Podaci dobiveni Internetom objekata i IP mreže povezuju pogon za proizvodnju sa sustavima za vođenje poduzeća i donositeljima odluka, tako što pružaju informacije s proizvodne linije donositeljima odluka i time unaprjeđuju učinkovitost tvornice. To, primjerice, znači da upravitelj pogona može vidjeti učinkovitost svakog stroja, imati uvid u proizvodnju s bilo koje lokacije te smanjiti vrijeme potrebno za donošenje i provedbu odluka. Drugim riječima, umjesto da budu zatvoreni u kontrolnoj sobi, upravitelji pogona i zaposlenici zaduženi za proizvodnju, imat će jednostavan pristup informacijama u realnom vremenu pa će tako i lakše surađivati.

U mnogim industrijama, energija je često drugi najveći operativni trošak. Razlog tome je što mnoge tvrtke nemaju efektivne sustave za mjerenje i upravljanje kako bi optimizirale potrošnju energije u pojedinim proizvodnim operacijama, a pogotovo ne u realnom vremenu, na više operacija, tvornica ili čak u cijelom lancu opskrbe. Internet objekata i automatizacija kontrole okoliša, kao što je HVAC (eng. *heating, ventilating, and air conditioning*), može na brojne načine omogućiti uštede proizvođačima. Ovakvi sustavi pomažu u izbjegavanju trošenja energije u vrijeme kada je ona najskuplja te čak omogućavaju planiranje potrošnje energije na temelju vremenske prognoze.

Proizvođači su već odavno prihvatili koncept preventivnog održavanja, ali mnogi ga još nisu implementirali. Smanjena cijena senzora, bežična povezanost i alati za obradu velikih količina podataka učinili su prikupljanje stvarnih podataka rada i nadziranje stanja opreme jeftinijim i jednostavnijim. Recimo, ako proizvođač ima opremu koja mora raditi unutar određenog raspona temperature, uz pomoć senzora je moguće uočiti kada temperatura prijeđe taj raspon i spriječiti nastanak kvara. Tvrtke koje se bave proizvodnjom gube veliku količinu novaca zbog zastoja opreme pa Internet objekata može pomoću u unaprjeđenju ukupne efikasnosti opreme, smanjenju gubitaka minimiziranjem zastoja opreme te pomoći poduzeću u provedbi planiranih aktivnosti održavanja.

Povezivanje proizvodne linije i opreme za balansiranje proizvodnje s dobavljačima omogućuje svima uključenim u lanac opskrbe da uoče međuovisnosti, tokove materijala i vremena potrebna za proizvodnju. Sustavi s Internetom objekata mogu, između ostaloga, pratiti položaj proizvoda, iz daljine pratiti stanje opreme te nadzirati dijelove i proizvode dok se kreću

kroz lanac opskrbe. Također, ovakvi sustavi mogu prikupljati i pružati informacije ERP (eng. *Enterprise resource planning*) sustavu, što omogućava proizvođačima prepoznavanje problema prije nego što se oni dogode, smanjivanje troškova zaliha te potencijalno smanjenje financijskih potreba tj. obrtnog kapitala [8].

Što se tiče samih proizvoda, ugrađivanje senzora u proizvode, umjesto da se dodaju naknadno, omogućava tvrtkama da odmah uoče proizvod s defektom, umjesto da rade naknadna ispitivanja kvalitete. Recimo, ako dođe do problema s kvalitetom proizvoda, proizvodna linija se može automatski isključiti prije nego što nastavi raditi proizvode koji će imati defekt. Uz to, na ovaj način će se ubrzati razvoj novih proizvoda jer će tvrtke moći nadzirati stvarno korištenje proizvoda od strane kupaca i tako brže unaprjeđivati proizvode. Isto tako, ugrađeni senzori će omogućiti tvrtkama nove izvore prihoda jer će, prodajom podataka o radu proizvoda, omogućiti kupcu da optimizira način njegove uporabe. Također, umjesto prodaje proizvoda, proizvođači mogu odlučiti iznajmljivati ga, po cijeni koja ovisi o tome koliko je proizvod zapravo korišten. Nešto slično postoji i danas, primjerice, cijena turbine mlaznog motora temelji se na tome koliko sati mlazni motor zapravo provede u radu [9].

Trenutno, pred uvođenjem Interneta objekata u proizvodne pogone postoje određene prepreke. Mnogi proizvođači koriste vlastite mreže, dok pametna proizvodnja zahtijeva mrežu temeljenu na IP-u koja omogućava uređajima unutar pogona da komuniciraju s operacijskim i poslovnim sustavima. Standardna IP mreža također olakšava povezivanje i komunikaciju s dobavljačima i kupcima, s ciljem unaprjeđenja preglednosti lanca opskrbe. Uz to, proizvođačima su potrebne robusne mreže koje se mogu nositi s brojnim radijskim frekvencijama u pogonu, teškim okolišnim uvjetima, prvenstveno toplinom i vlagom te mreže koje imaju dovoljnu pouzdanost za prijenos upozorenja i podataka u realnom vremenu. Naravno i ovdje je veliki problem sigurnost pa je potrebno ugraditi sigurnosne mjere, uključujući šifriranje hardvera, sigurnost samog pogona te sigurnost mreže za prijenos podataka. Mreža također mora osigurati siguran pristup podacima iz daljine, kao i pouzdan način identifikacije i autorizacije, kako ljudi, tako i proizvoda.

Ipak, Internet objekata će iz temelja promijeniti razvoj, proizvodnju, dostavu i prodaju proizvoda. Obzirom na brzinu promjena i evoluciju proizvoda i usluga, potreban je potpuno novi pristup njihovom razvoju, kao i pogonima i sustavima zaduženim za proizvodnju. Proizvođačima koji se prilagode ovim novim uvjetima i savladaju potrebne tehnologije, pružit će se raznovrsne nove prilike za uštede i povećanje prihoda.

2.4. Internet of Things iz perspektive industrije poluvodiča

Kao što je već navedeno, analitičari predviđaju da će broj ugrađenih uređaja koji koriste Internet objekata narasti sa sadašnjih 10 milijardi na preko 30 milijardi do 2020. godine, što znači godišnji rast od oko 3 milijarde novih uređaja. Svakom od ovih uređaja je potreban minimalno jedan mikrokontroler koji će uređaju omogućiti inteligenciju, jedan ili više senzora koji omogućavaju prikupljanje podataka, jedan ili više čipova koji omogućavaju povezivanje i prijenos podataka te memorijska komponenta. Za proizvođače poluvodiča ovo predstavlja izravnu priliku za rast koja je veća od gotovo svih nedavnih inovacija, uz iznimku, eventualno, smartphone-a. S druge strane, trenutno u industriji postoji nedostatak jasne perspektive o konkretnim poslovnim prilikama vezanim za Internet objekata, obzirom na široki spektar primjena koje se razvijaju, široki spektar potencijalnih tržišta i činjenicu da je trend još u počecima.

Unatoč tome, čini se da tržište uređaja, proizvoda i usluga temeljenih na Internetu objekata ubrzava prema točki infleksije, što je vidljivo i iz tehnoloških unaprjeđenja i povećane potražnje. Tehnološka unaprjeđenja se očituju u tome što neke poluvodičke komponente, ključne za većinu aplikacija Interneta objekata, pružaju mnogo veću funkcionalnost uz manju cijenu. Noviji procesori, kao što je ARM Cortex M, koriste otprilike samo desetinu energije koju su energetski najučinkovitiji procesori koristili prije samo dvije godine. Ovaj skok naprijed u tehnološkim mogućnostima je pogotovo vidljiv na rastućem tržištu pametnih satova. Prvi takvi proizvodi, predstavljeni 2012. godine, imali su procesore od 400 MHz i jednostavne, troosne akcelerometre. Danas, tipičan pametni sat sadrži dvojezgreni procesor brzine 1 GHz i najnoviji, šesteroosni senzor koji integrira žiroskop i akcelerometar. U međuvremenu, cijene čipova koji se koriste u ovim proizvodima su padale za otprilike 25 posto godišnje u zadnje dvije godine. Potražnja za proizvodima prve generacije Interneta objekata (fitness narukvice, pametni satovi, pametni termostati...) će rasti kako se tehnologije komponenta budu razvijale i njihova cijena bude padala. Slična dinamika se dogodila i sa porastom korištenja smartphone-a. Potražnja kupaca za smartphone-ima je skočila s oko 170 milijuna uređaja prodanih godišnje, prije samo četiri ili pet godina, na preko milijardu uređaja u 2014. godini. Povećanje narudžbi se poklopilo sa strmim padom cijena ključnih komponenta uređaja.

Kako bi se iskoristile novonastale prilike, potrebna je izraditi novu vrstu komponenta, tj. sustav uređaja temeljenih na čipovima posebno proizvedenim za Internet objekata, s optimalnim energetskim mogućnostima, mogućnošću povezivanja i integracijom senzora. Prva

generacija ovakvih čipova već postoji, iako će vjerojatno proći još nekoliko generacija prije nego što čipovi budu u stanju pružiti se potrebne funkcionalnosti. Primjerice, mnogim aplikacijama su potrebni uređaji koji su samoodrživi i oslanjaju se na prikupljanje energije i dugovječne baterije pa prema tome proizvođači poluvodiča, u svojim proizvodima, moraju uzeti u obzir potrebu za optimalnom potrošnjom i upravljanjem energijom. Proizvođači će također, u većoj mjeri nego do sada, morati naglasak staviti na fleksibilnost oblika jer će komponente morati biti dovoljno male da se mogu ugraditi u današnje pametne satove i pametne naočale, ali također pogodne i za dodatno smanjenje kod primjene u još neidentificiranim, budućim proizvodima. Uz to, potrebno je riješiti probleme vezane za sigurnost i privatnost. Uređaji temeljeni na Internetu objekata neće biti korišteni za kritične zadatke u, primjerice, industrijskim ili medicinskim okruženjima, ako ne postoje protokoli za povezivanje koji sprječavaju hakiranje, gubitak intelektualnog vlasništva i druge prekršaje. Proizvođači poluvodiča već ubrzano rješavaju neke od ovih izazova. Posebno ohrabruju njihovi napori u području povećanja integracije i novih standarda povezivanja.

Smatra se da je za proizvođače komponenata, umjesto proizvodnje zasebnih čipova za vlastite uređaje, bolja opcija proizvoditi komponente koje su dovoljno fleksibilne za upotrebu u različitim uređajima i industrijama te koje se mogu koristiti za aplikacije sa različitim karakteristikama. Ovi uređaji će se vjerojatno nalaziti negdje između dva ekstrema: jedan će biti visokoenergetski uređaji, visokih performansi, za obradu podataka, kao oni ugrađeni u pametne satove, a drugi ekstrem će biti jeftini, niskoenergetski, integrirani senzori koji uređaju omogućuju dovoljnu funkcionalnost i autonomiju rada [1].

Važno je naglasiti da bi proizvođači poluvodiča od Interneta objekata mogli i indirektno profitirati, obzirom da će podaci generirani od strane milijarda povezanih uređaja morati biti obrađeni, tj. svi ti „mali“ podaci moraju se pretvoriti u velike podatke (Big Data), dok će korisnicima također biti potreban i veći kapacitet za pohranu podataka, čime će se povećati potražnje za serverima i memorijom. Nadograđujući na postojeće tržište, tvrtke za proizvodnju poluvodiča mogu nastaviti snabdijevati kritične uređaje i komponente koje su ključne za rad proizvoda temeljenih na Internetu objekata. Prema tome, pitanje nije da li Internet objekata može proizvođačima poluvodiča pružiti održiv rast, nego kako najbolje kapitalizirati ovaj rastući trend u području razvoja tehnologije i razvoja ekosustava.

2.5. Internet objekata u području održavanja

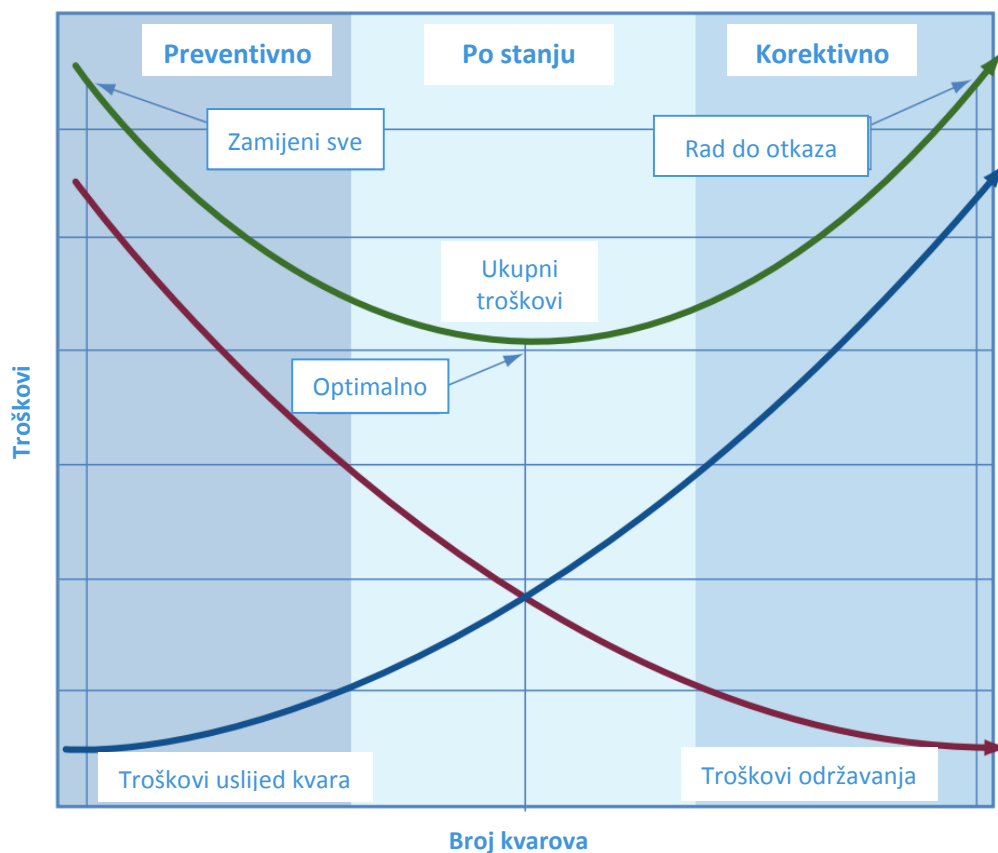
Održavanje predstavlja značajan udio u troškovima mnogih organizacija te se zaposlenici koji sudjeluju u održavanju konstantno nalaze pod pritiskom da smanje te troškove. Kako bi se ostvario ovaj cilj, potrebno je unaprijediti politiku održavanja u organizaciji.

Tradicionalno, u tvrtkama se najčešće provodi korektivno ili preventivno održavanje. Korektivno održavanje (eng. *Corrective Maintenance*) je svako održavanje koje se provodi nakon što oprema otkáže i potrebno ju je vratiti u radno stanje. Ovakav tip održavanja može biti planiran ili neplaniran. Planirano korektivno održavanje je rezultat „rad do otkaza“ (eng. *run-to-failure*) plana održavanja, dok do neplaniranog korektivnog održavanja može doći zbog kvara koji nije spriječilo preventivno održavanje ili zbog nedostatka bilo kakvog plana održavanja. Općenito, korektivno održavanje je mnogo skuplje od bilo kojeg oblika planiranog održavanja [10].

Preventivno održavanje (eng. *Preventive Maintenance*) je tip održavanja koji se provodi redovito na nekoj opremi kako bi se smanjila vjerojatnost njenog prestanka rada, tj. provodi se dok oprema još uvijek radi, kako se ne bi iznenada pokvarila. Općenito, preventivno održavanje se provodi na opremi od kritične važnosti te na opremi kojoj se vremenom i uporabom povećava vjerojatnost pojave kvara. Tipičan primjer za ovo je servis vozila nakon prijeđenih svakih 10,000 km. Preventivno održavanje je kompleksnije za provedbu od korektivnog održavanja jer je potrebno unaprijed isplanirati raspored održavanja i resurse potrebne za njegovu provedbu. S druge strane, ovaj tip održavanja je manje kompleksan od prediktivnog održavanja, tj. održavanja po stanju, jer nije potrebno nadzirati opremu i interpretirati dobivene rezultate. Najveća prednost ovog tipa održavanja je planiranje koje omogućava smanjenje troškova u odnosu na korektivno održavanje. Troškovi neplaniranog održavanja uključuju smanjenu proizvodnju, više cijene dijelova i dostave te gubitak vremena na otkrivanje uzroka kvara, što znači da su troškovi neplaniranog održavanja obično tri do devet puta veći od troškova planiranog održavanja. Planiranjem održavanja smanjuju se svi troškovi jer se oprema može zaustaviti u vrijeme smanjene proizvodnje te se prije same provedbe aktivnosti održavanja mogu prikupiti svi potrebni dijelovi, alati i zaposlenici, čime se štedi na vremenu. S druge strane, najveći i najčešći nedostatak preventivnog održavanja je prevelika učestalost provođenja aktivnosti održavanja. Održavanja je moguće optimizirati, tj. smanjiti učestalost provođenja aktivnosti održavanja bez gubitka pouzdanosti, no da bi se to ostvarilo potrebno je određeno

vrijeme za upoznavanje točnog ponašanja stroja. Način na koji se odmah može optimizirati održavanje je provedbom održavanja po stanju [11].

Održavanje po stanju (eng. *Condition Based Maintenance*) je strategija održavanja koja koristi stvarno stanje opreme kako bi odlučila koje aktivnosti održavanja je potrebno obaviti. Kod ovog tipa održavanja, ono se provodi samo kada određeni indikatori pokažu znakove smanjenja performansi i nadolazećeg kvara pojedinih dijelova opreme. Prema tome, optimizacijom intervala aktivnosti održavanja, optimiziraju se troškovi uslijed otkaza opreme koji se pojavljuju kod korektivnog održavanja i troškovi nepotrebnih aktivnosti održavanja kod preventivnog održavanja (Slika 3). Podaci o stanju se mogu prikupljati u određenim intervalima ili kontinuirano, što je slučaj kada stroj ima ugrađene senzore. Uz to, stanje opreme mora pokrenuti održavanje u dovoljno velikom vremenskom intervalu prije kvara, kako bi aktivnosti održavanja mogle biti obavljene prije nego što se kvar dogodi ili performanse opreme padnu ispod optimalne razine. Održavanje po stanju se najčešće koristi tamo gdje je najvažnija sigurnost i pouzdanost, kao recimo u zrakoplovnoj industriji, proizvodnji poluvodiča, industriji nafte i plina, proizvodnji nuklearne energije itd.



Slika 3. Održavanje po stanju optimizira troškove preventivnog i korektivnog održavanja [16]

Prednost održavanja po stanju je da se održavanje provodi dok je oprema u radu, čime se smanjuju poremećaji normalnog rada koji dovode do gubitaka, kao kod korektivnog održavanja. Uz to, smanjuju se troškovi uzrokovani otkazivanjem opreme jer se minimizira vrijeme u kojem stroj nije u radu te se povećava pouzdanost opreme. Također, minimizira se vrijeme potrošeno na održavanje i smanjuju se zalihe rezervnih dijelova jer se oni naručuju samo kada za to postoji stvarna potreba, a ne preventivno. S druge strane, glavni nedostatak održavanja po stanju su veliki početni troškovi ugradnje uređaja za nadzor, pogotovo na starijoj opremi, koju je često potrebno modificirati kako bi se ugradili senzori te veliki troškovi analize podataka pohranjenih u bazama podataka. Iz ovih razloga, važno je odrediti koji su dijelovi opreme najkritičniji, tj. koji dijelovi bi imali najviše koristi od primjene održavanja po stanju. Primjer za ovo je stavljanje fokusa na mjerenje vibracija kod rotacijske opreme i zanemarivanje manje važnih dijelova opreme. Uz to, uvođenje održavanja po stanju znači i pojavu troškova vezanih za obučavanje zaposlenika za rad s novim tehnologijama i analizu podataka jer nije jednostavno pretvoriti podatke mjerenja u znanje o stanju opreme, a uzrokuje i značajne organizacijske promjene koje je često teško provesti zbog otpora unutar organizacije [12]. Također, zamor materijala i iznenađan pad performansi opreme nije moguće jednostavno otkriti korištenjem senzora te postoji mogućnost da senzori ne mogu raditi u teškim uvjetima rada opreme [13]. Ipak, u današnje vrijeme, kada oprema postaje sve skuplja, a informacijski sustavi za prikupljanje, pohranu i analizu podataka postaju sve jeftiniji i pouzdaniji, održavanje po stanju postaje važan alat za optimalno vođenje pogona ili tvornice. Poboljšane operacije dovode do smanjenih troškova proizvodnje i smanjene upotrebe resursa, što, primjerice, dovodi do manjeg štetnog utjecaja na okoliš.

Tradicionalno, kada postoje problemi s opremom, informacija o tome se dostavlja ljudskim informacijskim lancem: radnik u pogonu obavještava nadzornika, koji potvrđuje problem i poziva održavatelje. Sve ove aktivnosti dodaju troškove i uzrokuju zastoje. S druge strane, korištenjem komunikacije između uređaja (M2M) koju omogućava Internet objekata, dobavljač opreme ili tzv. originalni proizvođač opreme (eng. *Original Equipment Manufacturer*, skr. OEM) ima saznanje u realnom vremenu o stanju svake opreme koju je izradio i ugradio kupcima, što znači da može mnogo brže otkriti probleme na opremi, u nekim slučajevima i prije nego što se oni dogode. Ovo se ostvaruje korištenjem prediktivne analitike, tj. korištenjem metoda rudarenja podataka. Podaci o proizvodnji, radu stroja te podaci sa senzora se agregiraju za analizu i koriste u izradi modela za predviđanje otkaza opreme ili loše kvalitete proizvodnje, čime se smanjuju troškovi i vrijeme zastoja. Pošto se podaci o kvarovima

dobiveni iz različitih izvora prikupljaju, agregiraju i analiziraju u realnom vremenu, u oblaku, moguće je, primjerice, tehničaru predložiti potrebne aktivnosti održavanja. Na ovaj način, moguće je u obzir uzeti sve podatke o kvaru, kao što su uvjeti rada, podaci o prethodnim popravcima iz računalnog sustava za upravljanje održavanjem (eng. *Computerized maintenance management system*, skr. CMMS), uzorci trošenja itd. Ovime, tehničar dobiva sve podatke potrebne za donošenje odluka i brzi pronalazak rješenja. Internet objekata će, također, značajno pojednostaviti popravak geografski raspršene opreme, ponajprije uklanjanjem potrebe za nepotrebnim posjetima raspršenoj opremi uslijed preventivnog održavanja. Umjesto toga, primjerice, povezane vjetroelektrane će same izrađivati vlastite naloge za popravak koje će slati u CMMS sustav, zajedno sa prijedlogom potrebnih aktivnosti održavanja i rezervnih dijelova. Treba uzeti u obzir da upravljanje ovako velikom količinom podataka zahtijeva softver koji može integrirati sve potrebne aktivnosti: izdvajanje, transformaciju, pročišćavanje, pohranu te statističko modeliranje podataka kojih može biti nekoliko desetaka terabajta, uz više tablica s milijardama redova.

Možda najvažnija mjera vezana za ostvarivanje pouzdane politike održavanja je dostupnost. Dostupnost se može definirati kao omjer opreme isporučene na vrijeme i ukupnog broja zahtjeva za opremom. Povećanjem dostupnosti bržim uočavanjem kvarova ili predviđanjem kvarova pomoću prediktivne analitike možemo poboljšati i tradicionalne ključne pokazatelje performansi, kao što su: prosječno vrijeme između kvarova, prosječno vrijeme potrebno za popravak i ukupni troškovi vlasništva. Pošto dostupnost ima tako velik utjecaj na učinkovitost sustava, sofisticirane strategije održavanja u budućnosti će također morati koristiti modele koji mogu precizno uočiti, mjeriti i predvidjeti dostupnost. To će biti olakšano korištenjem rudarenja podataka i prediktivnom analitikom, koje omogućavaju upotrebu već poznatih kvantitativnih metoda [14].

Treba naglasiti i kako će Internet objekata značajno redefinirati poslovni model mnogih originalnih proizvođača opreme jer će morati nadopuniti ponudu uslugama iz područja analitike podataka. Pošto će njihova oprema postajati sve inteligentnija i bolje povezana, originalni proizvođači opreme će stvoriti dodanu vrijednost kontinuiranim nadzorom i analizom, čime će se unaprijediti pouzdanost i smanjiti nepotrebnih troškovi održavanja. Prema tome, stvarna vrijednost tehnologije Interneta objekata može se ostvariti samo holističkim pristupom upravljanja imovinom i neprimjetnom interakcijom ove tehnologije s ostalim aplikacijama, kao što su CMMS programi, čime će koncept održavanja po stanju doživjeti eksponencijalan rast [15].

3. MJERENJE VIBRACIJA NA STROJNOJ OPREMI

Vibracije kod opreme s motorom su, najjednostavnije rečeno, oscilacije ili kretnje naprijed-natrag strojeva ili komponenata kao što su pogonski motori, pogonjene naprave (pumpe, kompresori i dr.), ležajevi, osovine, zupčanici i ostali elementi koji čine mehanički sustav.

Vibracije ne moraju uvijek predstavljati problem niti uzrokovati zabrinutost jer su često dio normalnog rada stroja. Kod nekih zadaća, vibracije su nužne. Primjerice, oscilirajuće brusilice koriste vibracije za odstranjivanje materijala i završnu obradu metala, dok vibrirajući konvejeri pomiču materijal pomoću vibracija. U drugim slučajevima, vibracije se uzimaju u obzir tijekom konstrukcije strojeva jer su gotovo neizbježne u radu, primjerice naizmjeničnih pumpi i kompresora te motora s unutarnjim izgaranjem. Prema tome, kod dobro konstruiranog i dobro održavanog stroja, vibracije ne bi trebale predstavljati problem.

Ipak, većina industrijske opreme konstruirana je da radi bez vibracija i izbjegava njihovu pojavu, tako da vibracije na industrijskoj opremi mogu često biti i pokazatelj i uzrok problema. Drugim riječima, kod ovakvih strojeva, vibracije mogu biti pokazatelj pojave problema ili pogoršanja stanja opreme te same vibracije mogu uzrokovati dodatnu štetu. Prema tome, uređaji kao što električni motori, rotirajuće crpke, kompresori, ventilatori i puhala u idealnom slučaju rade bez pojave vibracija. Uzroci vibracija mogu biti različiti te se mogu pojaviti pojedinačno ili u kombinaciji, a najčešći su: neuravnoteženost (debalans), loše poravnanje, trošenje/kvar ležajeva i labavost spojeva. Vibracije uslijed neuravnoteženosti nastupaju kada oko osi stroja rotira dio neuravnotežene mase, stvarajući tako centrifugalnu silu. Neuravnoteženost mogu uzrokovati greške u proizvodnji (greške prilikom obrade odvajanjem čestica, greške prilikom lijevanja) ili greške prilikom održavanja (deformiranje lopatica ventilatora, nedostatak utega za balansiranje). Kako se povećava brzina rada stroja, učinci neuravnoteženosti postaju sve veći pa se značajno skraćuje životni vijek ležaja te dolazi do nepotrebnih vibracija stroja. Drugi razlog pojave vibracija je loše poravnanje osovina do kojeg dolazi kada osi, primjerice motora i pumpe, nisu paralelne. U slučaju da su osi paralelne, ali ne potpuno poravnate, radi se o tzv. paralelnom odstupanju. Do odstupanja može doći tijekom montaže stroja ili može nastati tijekom vremena uslijed toplinskog širenja, pomaka dijelova ili loše ponovne montaže nakon održavanja. Rezultirajuće vibracije mogu biti radijalne, aksijalne ili kombinacija radijalnih i aksijalnih. Također, vibracije mogu nastati trošenjem ili kvarom dijelova kao što su kuglični ili valjni ležajevi, pogonski remeni i zupčanici. Primjerice, kada se na kotrljajućem ležaju pojave

pukotine, kotrljajući dijelovi ležaja će uzrokovati vibracije svaki put kada prijeđu preko oštećenog područja. Isto tako, vibracije nastaju kada je zub zupčanika jako istrošen ili kada se pogonski remen počne raspadati. Uz to, značajne vibracije mogu biti i posljedica labavo ugrađenih ležaja ili labave ugradnje dijelova na nosače. Labavost mogu uzrokovati i same vibracije, no koji god bio uzrok, labavost dopušta svim postojećim vibracijama da uzrokuju štetu kao što je dodatno trošenje ležajeva te trošenje i zamor nosača opreme i ostalih dijelova.

Vibracije mogu imati teške posljedice na stanje opreme, a najčešće su ubrzano trošenje i oštećenje dijelova. Uz to, vibracije mogu uzrokovati buku, sigurnosne probleme i općenito dovesti do degradacije uvjeta rada u pogonu, kao i povećati potrošnju energije strojeva te smanjiti kvalitetu proizvoda. U najgorem slučaju, vibracije mogu dovesti do prestanka rada opreme i time uzrokovati zastoj proizvodnje.

Za bolje razumijevanje pojavnih oblika vibracija, razmotrimo jednostavan rotacijski uređaj kao što je električni motor. U ovom primjeru, motor i osovina rotiraju oko osi osovine, a na oba kraja osovine su ležajevi. Jedan od ključnih predmeta analize vibracija je smjer sile vibriranja. U našem primjeru, do vibracija može doći uslijed djelovanja sile u radijalnom smjeru (od osovine prema van) ili u aksijalnom smjeru (paralelno s osovinom). Neuravnoteženost motora, primjerice, bi najvjerojatnije uzrokovala radijalne vibracije jer bi neuravnotežena masa stvarala centrifugalnu silu koja bi vukla motor prema van prilikom rotacije osovine za 360 stupnjeva. Loše poravnanje osovine bi moglo uzrokovati vibracije u aksijalnom smjeru zbog odstupanja u spajanju motora i osovine. Drugi ključan faktor kod vibracija je amplituda, tj. jačina vibracija. Što je manje naš motor u ravnoteži, veća je amplituda vibracija. Na amplitudu može utjecati i brzina rotacije jer što je ona veća, značajno se povećavaju i sile uzrokovane neravnotežom. Treći faktor je frekvencija koja se odnosi na brzinu oscilacija, tj. brzinu kretanja stroja naprijed i natrag uslijed djelovanja sila koje uzrokuju vibracije. Frekvencija se uobičajeno izražava u ciklusima u minuti (min^{-1}) ili hercima (Hz). Jedan Hz jednak je jednom ciklusu u sekundi. Iako je navedeni primjer jednostavan, čak i ovakav uređaj može imati kompleksne uzroke vibriranja jer tijekom rada može vibrirati u više smjerova (radijalno i aksijalno), uz nekoliko različitih amplituda i frekvencija. Ako ovdje uključimo vibracije uslijed neuravnoteženosti, aksijalne vibracije, vibracije uslijed trošenja valjnih ležaja i druge uzroke, dobiva se vrlo složen spektar vibracija [17].

3.1. Postupak mjerenja i analize vibracija

Postoji i pozitivan aspekt pojave vibracija kod strojeva. Ako se ispravno mjere i analiziraju, vibracije se mogu koristiti u održavanju po stanju kao pokazatelj stanja opreme i time navesti zaposlenike u održavanju na poduzimanje potrebnih aktivnosti prije otkazivanja opreme. Uz to, mjerenje vibracija se često koristi i kao dijagnostički alat za otkrivanje uzroka i mjesta na kojem se pojavljuje problem. Razlog tome je što svaki tip kvara ima karakterističnu komponentu vibracijskih karakteristika koje se mogu filtrirati i definirati. Pri mjerenju vibracija strojeva, obično se mjeri spektar vibracija jer on mnogo govori o stanju dijela te uzroku vibracija, stoga je vrlo važno da se ovaj podatak mjeri uz visoku točnost. Proces analize vibracijskog stanja opreme sastoji se od sljedećih koraka:

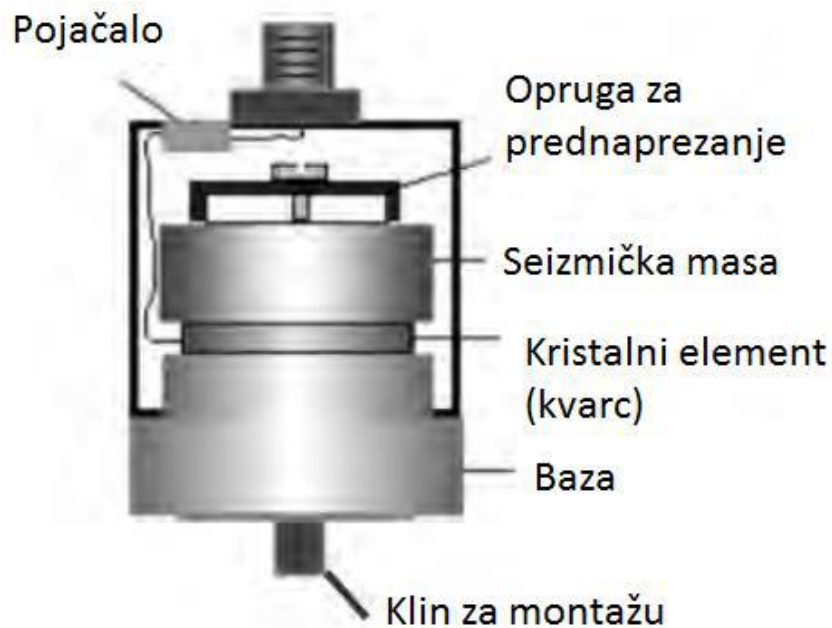
- Snimanje vibracija opreme
- Konverzija vibracijskog u električni signal
- Transformacija električnog signala na njegove komponente
- Prikaz prikupljenih podataka i informacija
- Spremanje i dokumentiranje podataka i informacija

Za mjerenje vibracija koriste se pretvornici vibracija, tj. uređaji sa sposobnošću pretvaranja energije vibracija u drugi tip energije (najčešće električnu struju ili napon). Tri glavne vrste gibanja koje otkrivaju uređaji za mjerenje vibracija su: pomak, brzina i ubrzanje. Izbor između ove tri vrste pretvornika gibanja ovisi o frekvencijama koje se žele analizirati [18].

Senzori pomaka se koriste samo za mjerenje niskih frekvencija (1 do 100 Hz) i korisni su za mjerenje pomaka sa niskim amplitudama. Najčešće se primjenjuju za mjerenje kretanja osovine i mjerenje zračnosti. Tradicionalno, uređaji za mjerenje pomaka koriste beskontaktnu induktivne senzore, a odnedavno su se počeli primjenjivati i piezoelektrični pretvornici kako bi se otklonili problemi vezani za postavljanje beskontaktnih uređaja. Za mjerenje niskih i srednjih frekvencija (1 do 1000 Hz) koriste se senzori brzine, jer oni filtriraju signale visoke frekvencije pa su manje podložni preopterećenju pojačala, što može utjecati na točnost niskofrekventnih signala. Pretvornici brzine se najčešće koriste za mjerenje i balansiranje rotirajuće opreme te se također u zadnje vrijeme sve više koriste piezoelektrični uređaji.

Ipak, u praksi se za mjerenje vibracija najčešće koriste piezoelektrični akcelerometri. Razlog tome je što akcelerometar može mjeriti u širokom rasponu frekvencija, od vrlo niskih do vrlo visokih (1 do 20000 Hz) te postoji široki spektar ovih uređaja, prilagođenih primjeni.

Uz to, čvrsta i otporna konstrukcija piezoelektričnog senzora omogućava mu rad i u najtežim uvjetima jer na njega ne utječe prljavština, ulje ili agresivne atmosfere. Također, mogu se koristiti u širokom rasponu temperatura te su otporni na jače udarce i vibracije. No, njihova najveća prednost je široki raspon frekvencija koje pokrivaju te visoka točnost od vrlo niskih do vrlo visokih amplituda gibanja. Uz to, piezoelektrični pretvornici s unutarnjim pojačanjem za rad zahtijevaju samo izvor energije i uređaj za očitavanje izmjerenih vrijednosti. Princip rada senzora je da piezoelektrični element u senzoru stvara signal proporcionalan ubrzanju. On zapravo mjeri brzinu promjene brzine gibanja dijela. Naime, akcelerometar za svaku os koristi zasebnu seizmičku masu. Ubrzanje u smjeru određene osi uzrokuje pomak dotične seizmičke mase koji detektiraju kapacitivni senzori zbog piezoelektričnog efekta kvarca (Slika 4). Dobiveni signal ubrzanja može biti pojačan za mjerenje akceleracije ili pretvoren u signal brzine ili pomaka [19].



Slika 4. Konstrukcija piezoelektričnog akcelerometra [18]

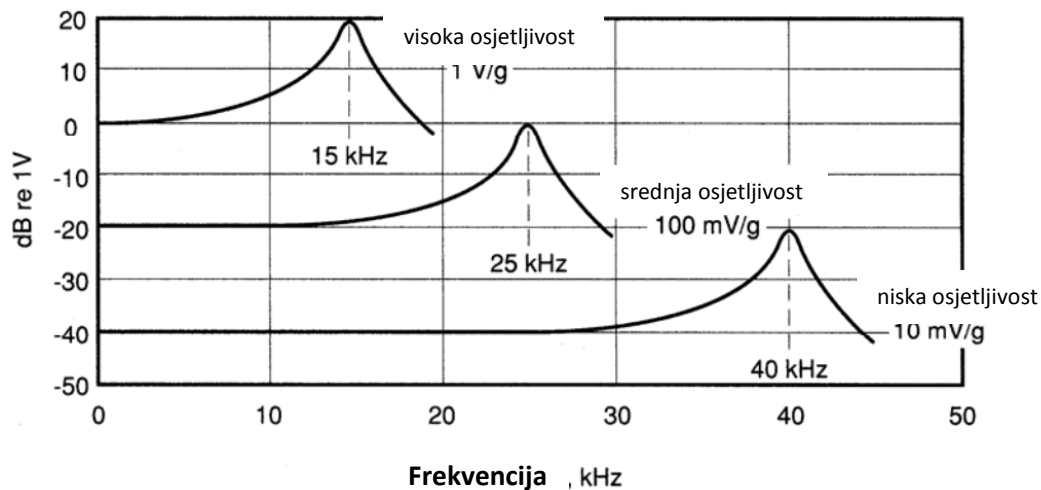
Pri odabiru industrijskog akcelerometra, u obzir se moraju uzeti mnogi parametri kako bi se odabrao najbolji senzor za aplikaciju. Među najvažnije spadaju: razina vibracija, raspon frekvencija koji se promatra, temperaturne promjene kojima će akcelerometar biti izložen, prisutnost elektromagnetnih polja, opasnost od elektrostatičkog pražnjenja itd. Također, u obzir treba uzeti i dva glavna parametra akcelerometra, a to su osjetljivost i raspon frekvencija. Općenito, većina akcelerometara koji mjere visoke frekvencije imaju nisku osjetljivost i obrnuto, većina akcelerometara visoke osjetljivosti mjeri frekvencije u niskom rasponu. Prema

tome, pri odabiru akcelerometra ponekad je potrebno napraviti kompromis između osjetljivosti i raspona frekvencija.

Osjetljivost industrijskih akcelerometara uobičajeno iznosi 10 mV/g ili 100 mV/g. Za odabir prave osjetljivosti za aplikaciju, potrebno je barem otprilike znati raspon amplituda vibracija, nužnih za obavljanje svih relevantnih mjerenja. Ako uređaj stvara vibracije visoke amplitude i zanimaju nas upravo te vibracije, preporučljivo je koristiti akcelerometar niske osjetljivosti (10 mV/g). Aplikacije ovog tipa uključuju sustave u kojima se mjeri samo širokopojasna razina vibracija ili akcelerometri služe samo za pokretanje prekidača. U slučaju mjerenja vibracija malih amplituda, koristi se akcelerometar veće osjetljivosti (100 mV/g). Bitno je naglasiti da, ako postoje vibracije visoke amplitude, izvan raspona amplitude akcelerometra, one mogu uzrokovati preopterećenje pojačala i iskrivljenje signala. Prema tome, jedno od najboljih svojstava piezoelektričnih akcelerometara je njihov široki raspon mjerenja, ali on je koristan samo ako se odabere osjetljivost ispravna za dotičnu aplikaciju.

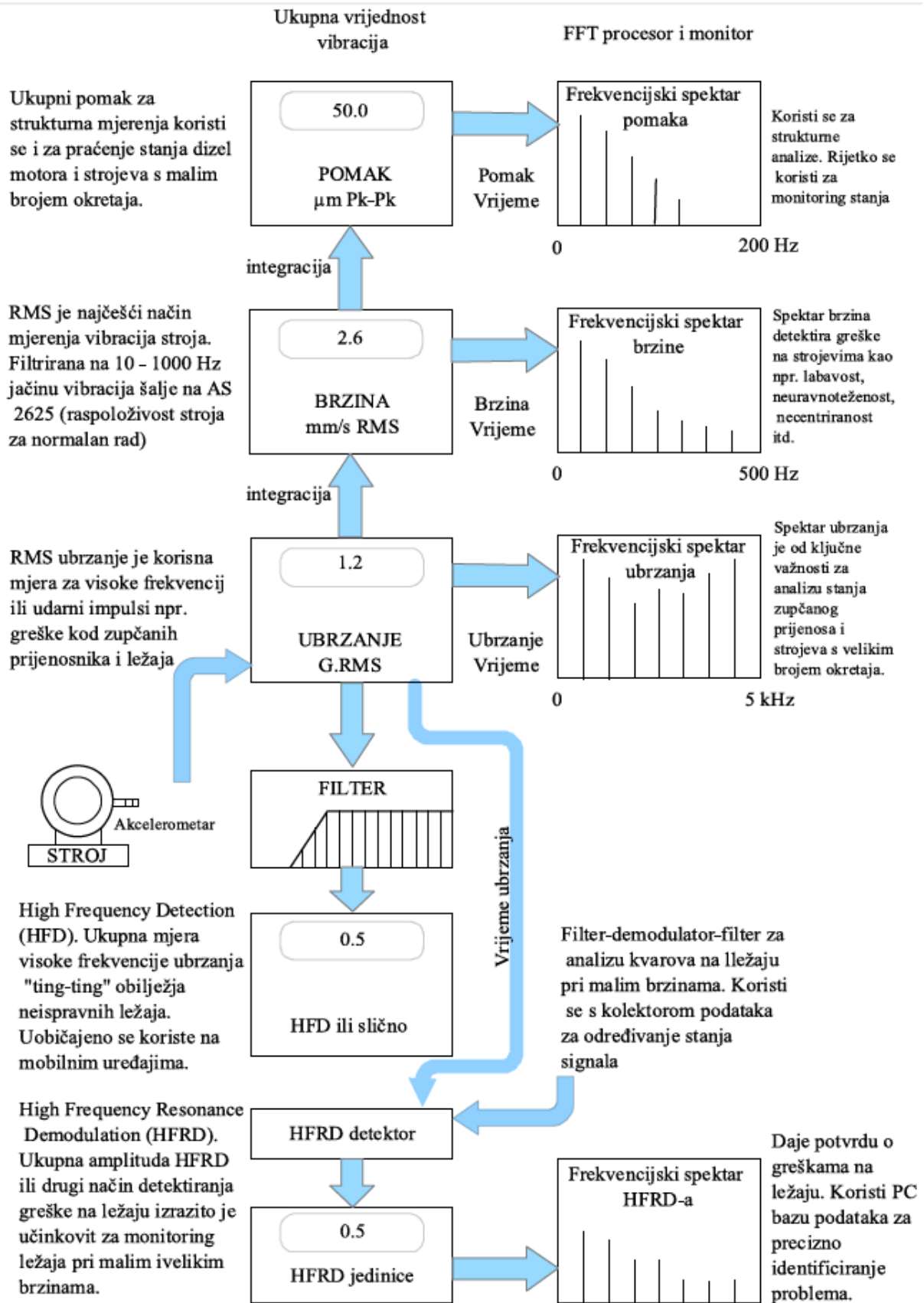
Za određivanje raspona frekvencija akcelerometra, mora se napraviti određena procjena frekvencijske karakteristike uređaja. Često je potreban raspon frekvencija već poznat na temelju prijašnjih mjerenja vibracija na sličnim sustavima ili aplikacijama. Isto tako, moguće je da inženjeri imaju dovoljno podataka o strojevima za izračunavanje frekvencija koje ih zanimaju. Ponekad je najbolja metoda postavljanje testnih akcelerometara na različita mjesta na uređaju i korištenje prikupljenih podataka za određivanje najboljeg akcelerometra koji će biti trajno postavljen. Raspon frekvencija samog akcelerometra je ograničen mehaničkom rezonancijom s jedne strane i filterom niskih frekvencija pojačala s druge. Mnoga pojačala akcelerometara imaju filter i za visoke frekvencije kako bi razrijedili rezonantne amplitude i smanjili električno iskrivljenje signala. Slika 5 prikazuje frekvencije na kojima dolazi do rezonancije prilikom mjerenja vibracija visokih i niskih frekvencija akcelerometrima različitih osjetljivosti [19].

Većina vibracija koje stvaraju industrijski uređaji imaju frekvencije ispod 1000 Hz, no često se zanimljive komponente signala nalaze na višim frekvencijama. Stoga, ako je moguće, dobro je odrediti visokofrekventne potrebe aplikacije i odabrati akcelerometar s najvećim rasponom frekvencija za odgovarajuću osjetljivost i raspon amplituda. Također, treba spomenuti da akcelerometri s najvećim seizmičkim masama i nižim rasponom frekvencija obično imaju niži prag električnog šuma. Ovime se povećava raspon amplituda, što kod nekih aplikacije može biti važnije od mjerenja visokih frekvencija. Uz to, većina akcelerometara ne može mjeriti frekvencije manje od 5 Hz pa se u tom slučaju mora osigurati njegova dovoljna osjetljivost kako bi i dalje mogao mjeriti amplitude.



Slika 5. Frekvencije pri kojima uobičajeno dolazi do pojave rezonancije [19]

Akcelerometar, kao niti bilo koji drugi senzor, ne može se koristiti samostalno, nego mora biti povezan s računalom kako bi se mogli prikupljati i analizirati dobiveni podaci. Drugim riječima, kako tehnički sustav vibrira na različitim frekvencijama i različitim amplitudama, uređaj za mjerenje bilježi kompleksnu vibraciju u vremenskoj domeni, dok se na računalu provodi analiza spektra koja omogućuje prikaz u frekventnoj domeni. Spektar se analizira tako da se uvede treća os (frekvencija), okomita na osi vremena i amplitude, dok se pretvorba u frekvencijsku domenu vrši brzom Fourierovom transformacijom (eng. *Fast Fourier Transform*, skr. FFT). Vremenska domena prikazuje sumu svih individualnih frekvencija u trenutku vremena, a frekvencijska lokaciju i amplitudu za svaku frekvencijsku komponentu. Ovime se omogućuje detekcija ukupnih visokih frekvencija (eng. *High Frequency Detection*, skr. HFD), što je obilježje neispravnih ležajeva koji rade pri velikim brzinama, kao i korištenje filtera za demoduliranje (eng. *High Frequency Resonance Demodulation*, skr. HFRD). Ukupna amplituda HFRD izrazito je učinkovit način detektiranja greške i analize kvarova na ležaju pri malim i velikim brzinama (Slika 6). Nakon obrade, najčešće se, u dijagnostičke svrhe, koristi dijagram spektra koji prikazuje niz vibracijskih frekvencija naspram jačine vibracija [18].



Slika 6. Dijagram procesa mjerenja i analize vibracija [18]

3.2. Smjernice pri mjerenju vibracija

U prethodnom poglavlju navedeno je da je spektar vibracija najvažniji alat pri analiziranju vibracija pa se on i najčešće mjeri jer najviše govori o stanju dijela te uzroku pojave vibracija. Iz tog razloga, važno je ovako vitalan podatak mjeriti uz što veću točnost. Kako bi se to osiguralo, potrebno je prilikom mjerenja pratiti određene smjernice.

Za početak, nužno je odlučiti koje strojeve je potrebno nadzirati. Strojevi od kritične važnosti moraju imati prioritet nad ostalima i općenito se moraju redovito nadzirati, tj. mora se provoditi održavanje po stanju ili barem preventivno održavanje, kako bi se izbjegli nepredviđeni i skupi problemi. U ovu skupinu strojeva spadaju:

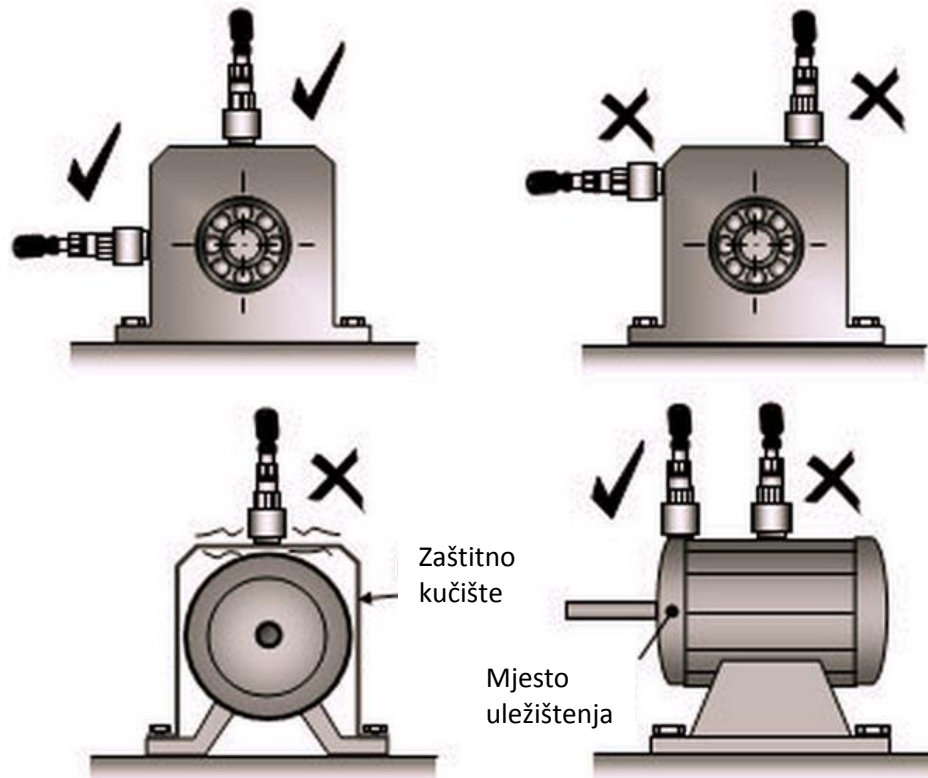
- a) strojevi koji, u slučaju kvara, zahtijevaju skupe, dugotrajne ili komplicirane popravke
- b) strojevi koji su kritični za proizvodnju ili općenito za operacije postrojenja
- c) strojevi za koje je poznato da se učestalo kvare
- d) strojevi za koje se vrši procjena pouzdanosti
- e) strojevi koji imaju utjecaj na sigurnost ljudi ili okoline.

Zatim, potrebno je odrediti način na koji će se mjeriti vibracije. Već je spomenuto da su dostupni različiti senzori za mjerenje vibracija i da se najčešće upotrebljava akcelerometar, koji stvara električni signal koji je proporcionalan akceleraciji vibrirajućeg dijela na koji je pričvršćen. Signal o akceleraciji se prenosi s akcelerometra na uređaj koji ga pretvara u signal o brzini, a spektar brzine je deriviran iz valnog prikaza brzine matematičkim računanjem poznatim kao brza Fourierova transformacija.

U sljedećem koraku nužno je odrediti mjesto na koje će se postaviti akcelerometar. Većina uređaja koji se često koriste u praksi, kao što su motori, pumpe, kompresori, ventilatori, remenice i mjenjači, sadrže rotacijske mehanizme. Isto tako, većina rotacijskih mehanizama ima ležajeve koji podupiru težinu rotirajućih dijelova i podnose sile koje se pojavljuju prilikom rotacije i vibracije. Općenito, ležajevi moraju biti u stanju trpjeti velike sile pa nije iznenađujuće da se prvi simptomi i oštećenja najčešće događaju upravo na ležajevima. Stoga, mjerenje vibracija se najčešće provodi na ležajevima strojeva, pri čemu se akcelerometri postavljaju na ili u blizini ležaja. Isto tako, treba uzeti u obzir da način na koji se postavlja akcelerometar jako utječe na točnost mjerenja pa se i u ovom slučaju moraju pratiti određene smjernice:

a) Senzor se postavlja što bliže ležaju

Pri mjerenju vibracija, akcelerometar se uvijek mora postaviti što bliže ležaju. Točnije, mora se postaviti što je bliže moguće osi ležaja kako bi se izbjeglo prikupljanje iskrivljenih signala. Slika 7 prikazuje primjere ispravnog i neispravnog postavljanja akcelerometra.



Slika 7. Primjer ispravnog i neispravnog postavljanja akcelerometra [21]

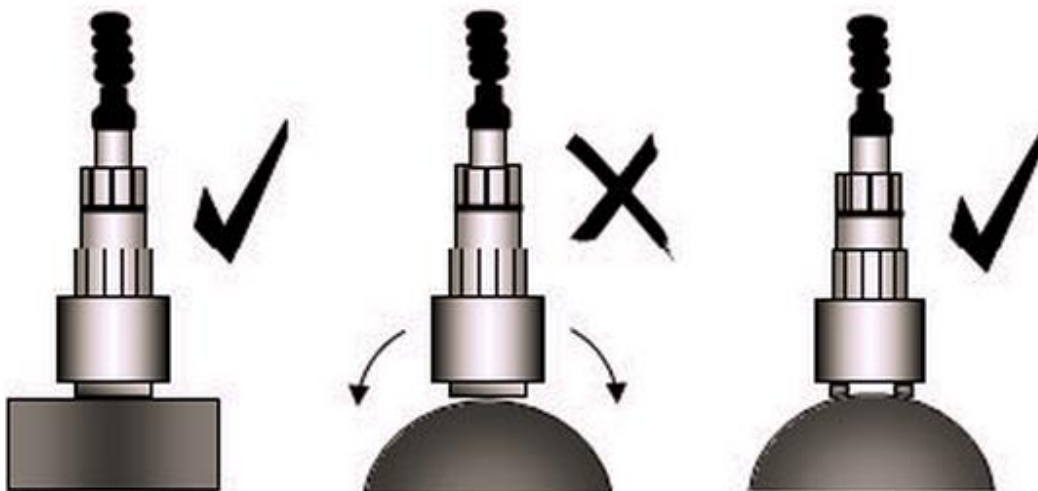
b) Akcelerometar mora biti dobro pričvršćen

Kako bi akcelerometar detektirao stvarno vibracijsko ponašanje, mora prolaziti kroz potpuno iste vibracijske pokrete kao i vibrirajući dio. Iz tog razloga, akcelerometar mora biti dobro pričvršćen na vibrirajući dio kako se ne bi pomicao neovisno o dijelu. Labavo postavljen akcelerometar stvara signale deformirane uslijed vlastitih neovisnih kretnji i time daje pogrešna očitavanja. Općenito, postoje četiri načina pričvršćivanja senzora vibracija: pomoću klina s navojem, lijepljenjem, magnetom i bez fiksne montaže. Način pričvršćivanja najviše ovisi o zahtjevima vezanim za raspon frekvencija i amplituda. Najpopularnije među komercijalnim rješenjima je pričvršćivanje pomoću magneta jer nudi kompromis između pouzdanosti mjerenja i pogodnosti za korisnika. Također, na ovaj način, isti akcelerometar se može pričvrstiti na više uređaja, uz minimalno vrijeme potrošeno na pričvršćivanje i odvajanje. Kako bi se osiguralo dobro pričvršćivanje, magnetno postolje mora biti

postavljeno na jednoliku površinu, tj. mora biti sigurno postavljeno na površinu s akcelerometrom pozicioniranim u odgovarajućoj orijentaciji (Slika 8). Površina je jednolika samo ako na njoj nema krhotina, korozije ili ljuštenja boje. Naravno, površina na koju se postavlja akcelerometar mora biti magnetska, tj. izrađena od legure željeza, nikla ili kobalta. Magnetno postolje ne smije, primjerice, biti pričvršćeno na površinu od aluminijske pomoću komada željeza ispod aluminijske. Isto tako, magnetno postolje ne smije trpjeti udarce ili se zagrijavati jer time može izgubiti magnetska svojstva. Spajanje klinom s navojem dopušta mjerenje u najvećem rasponu i njegova primjena se preporuča kod sustava za permanentno mjerenje vibracija, mjerenje vibracija visokih frekvencija i teške uvjete mjerenja. U ovom slučaju potrebno je paziti sa se navoj ne stegne prevelikim ili nedovoljnim momentom te da nije oštećen. Ako se na uređaju ne može napraviti provrt, sljedeće najbolje rješenje je lijepljenje, iako se ovom metodom akcelerometar obično oštećuje prilikom odvajanja. Stoga se i kod ove metode često koristi postolje koje je ravno s jedne strane, dok na drugoj strani ima provrt s navojem. Za optimalne rezultate, površinu uređaja koji se ispituje treba pripremiti na isti način kao i kod korištenja magnetskog postolja. Postavljanje senzora bez fiksne montaže podrazumijeva držanje rukom ili pomoćnim držačima [20].

c) Akcelerometar mora biti ispravno orijentiran

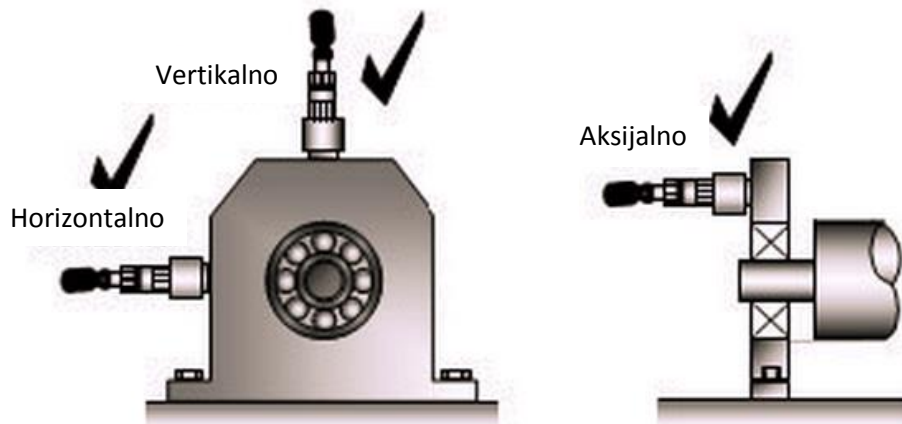
Različite situacije zahtijevaju različite orijentacije akcelerometra. Primjerice, za otkrivanje



Slika 8. Magnetno postolje mora biti postavljeno na jednoliku površinu [21]

paralelnog odstupanja, akcelerometar se uobičajeno postavlja u radijalnom smjeru ležaja, dok za otkrivanje kutnog odstupanja, akcelerometar mora biti postavljen u aksijalnom

smjeru (Slika 9). Signal koji proizvodi akcelerometar toliko je ovisan o orijentaciji jer amplituda vibracija varira u različitim smjerovima.



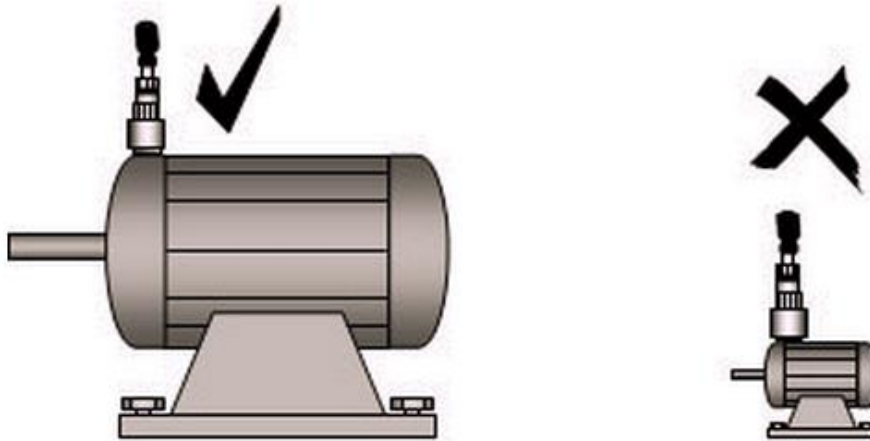
Slika 9. Primjer ispravne orijentacije akcelerometra [21]

d) Isti akcelerometar mora biti postavljen na isto mjesto

Za točno određenu točku mjerenja važno je uvijek postaviti akcelerometar na isto mjesto kako bi se minimizirale nedosljednosti u mjerenju koje mogu dovesti do pogrešnih zaključaka. Isto tako, ako je moguće, dobro je uvijek koristiti isti akcelerometar za određenu točku mjerenja.

e) Akcelerometar mora biti postavljen na nešto veliko i čvrsto

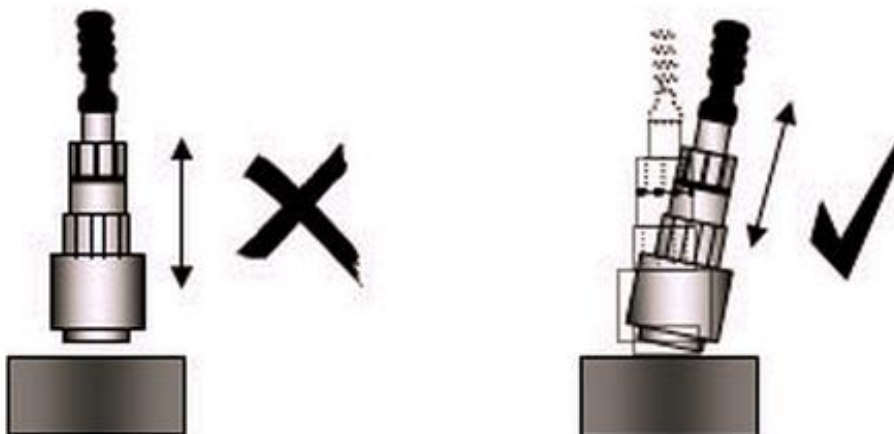
Akcelerometar se nikada ne smije postaviti na vrlo fleksibilan dio stroja jer će spektar biti deformiran uslijed gibanja fleksibilnog dijela. Isto tako, akcelerometar se nikada ne smije koristiti na strukturama koje su vrlo lagane jer će težina akcelerometra i magnetnog postolja deformirati vibracijsko ponašanje strukture. Općenito, ukupna težina akcelerometra i magnetnog postolja bi trebala biti manja od 10% težine vibrirajuće strukture (Slika 10).



Slika 10. Težina akcelerometra mora biti znatno manja od težine ispitivanog uređaja [21]

f) S akcelerometrom treba pažljivo postupati

Akcelerometar može stvarati nepouzdan signale u slučaju grubog postupanja njime. Potrebno je posebno pažljivo postupati prilikom pričvršćivanja akcelerometra na površinu, zbog snage magnetnog postolja. U ovoj situaciji, najbolji način za izbjegavanje oštećenja je približavanjem magnetnog postolja površini pod kutom, umjesto vertikalno (Slika 11). Također, prilikom odvajanja magnetnog postolja, akcelerometar se ne smije koristiti kao poluga. Umjesto toga, kod odvajanja, mora se prihvatiti i zaokrenuti njegovo magnetno postolje [21].



Slika 11. Pogrešan i pravilan način postavljanja akcelerometra [21]

3.3. Rješenja koja trenutno postoje u području mjerenja vibracija

Trenutno dostupni komercijalni uređaji za mjerenje vibracija mogu se podijeliti na ručne sustave za mjerenje i analizu vibracija (eng. *handheld*), sustave za permanentno prikupljanje i analizu podataka o vibracijama te uređaje za balansiranje rotacijskih tijela. Ove uređaje nude mnogi proizvođači te ih najčešće odlikuje jednostavno korištenje, velika brzina prikupljanja podataka i visoka pouzdanost. Danas se najčešće rade 3-u-1 integrirani sustavi mjerenja vibracija koji objedinjuju funkcije prikupljanja podataka, analize vibracija i balansiranja sustava. Na ovaj način se provodi sveobuhvatna procjena stanja stroja kroz mjerenje apsolutnih vibracija ležajeva, relativnih vibracija osovine, stanja ležajeva itd. te se provodi dijagnostika FFT (eng. *Fast Fourier Transform*) spektrom. Također se provodi i CPB (eng. *Constant Percentage Bandwidth*) spectrum analiza. Ona ima višu rezoluciju spektra niže frekvencije, kao primjerice kod kvarova kliznih ležajeva, vibracija osovine i kvarova na spojevima te nižu rezoluciju spektra više frekvencije koje se pojavljuju kod kvarova kugličnih ležajeva, prijenosa i zupčanika. Uz to, ovakvi integrirani sustavi najčešće imaju modul za praćenje stanja koji omogućava brzi uvid u postojanje i amplitudu vibracija sustava, mjerenje i prikaz rezultata u realnom vremenu te mogućnost testiranja za utvrđivanje rezonancije. Isto tako, koriste i module koji omogućavaju sistematično prikupljanje i pohranu podataka o mjerenjima, uz više mogućih točaka mjerenja i ruta [22]. Primjer ovakvog uređaja je Schenck Vibrotest 60 ručni uređaj za mjerenje vibracija (Slika 12).



Slika 12. Schenck Vibrotest 60 ručni uređaj za mjerenje vibracija

4. SUSTAV ZA MJERENJE VIBRACIJA PRIMJENOM INTERNETA OBJEKATA

Prikupljanje podataka se uobičajeno mora obaviti pomoću računala ili specijaliziranih uređaja, što može predstavljati problem. Razlog tome je što su osobna računala relativno skupa i nefleksibilna, tj. ne pružaju mogućnost povezivanja sa širokim spektrom uređaja i senzora, nego samo s nekim perifernim uređajima kao što su pisači, vanjski diskovi itd. Isto tako, nedostatak profesionalnih uređaja specijaliziranih za prikupljanje podataka o vibracijama je njihova visoka cijena. Naime, ona se može kretati od 500 dolara za početne do nekoliko tisuća dolara za naprednije modele s dodatnim mogućnostima analitike.

Iz navedenih razloga, pojavila se potreba za alternativom u vidu relativno jeftinog uređaja koji će služiti kao malo računalo te ujedno i kao platforma za inovacije. Tako su nastala jeftina i jednostavna za korištenje, Raspberry Pi i Arduino računala, koja igraju važnu ulogu u trenutnom razvoju proizvoda temeljenih na konceptu interneta objekata. Na tiskanoj pločici Raspberry Pi računala nalazi se mikroprocesor, VGA izlaz za povezivanje monitora te je moguće priključiti i miš i tipkovnicu, što znači da ga se može koristiti gotovo kao normalan PC, tj. moguće je koristiti Internet, prikazivati filmove u visokoj rezoluciji, pisati dokumente, koristiti proračunske tablice, igrati igre itd. U isto vrijeme, računalo ima veliku fleksibilnost jer je moguće na njega priključiti različite elektroničke komponente i njima upravljati te ima mogućnost povezivanja na Internet, žicom ili bežično s bilo koje točke koja ima Wi-Fi ili GSM vezu. Također, uređaj, zbog integriranosti, malih dimenzija i razumnih energetske potrebe, ima veliku mobilnost, a cijena mu je vrlo prihvatljiva i iznosi svega 30-ak dolara.

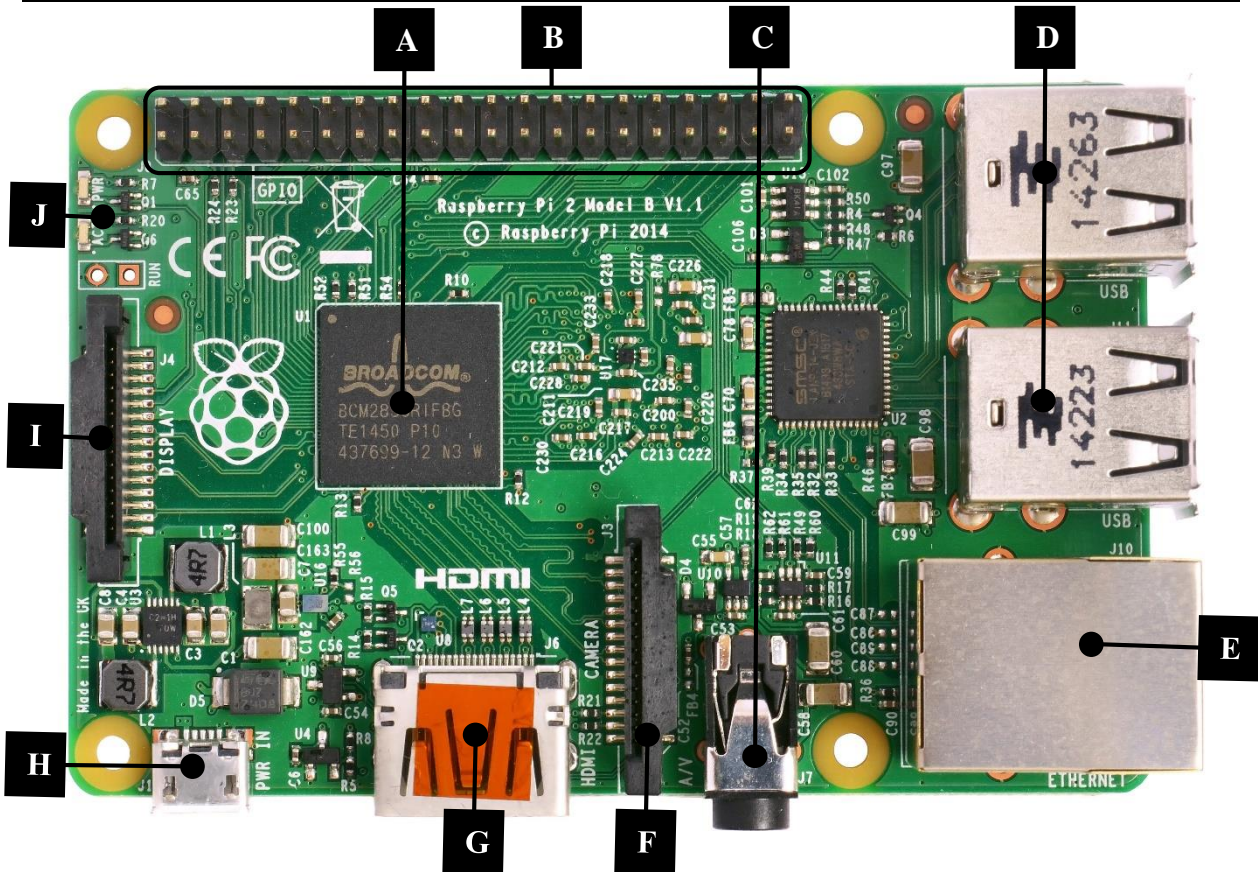
Upravo zbog jednostavnog povezivanja sa sensorima i drugim elektroničkim komponentama, Raspberry Pi često koriste hobisti, učenici i poduzetnici za izradu i testiranje proizvoda temeljenih na Internetu objekata. Isto tako, oko ove dvije razvojne platforme sada je već nastala zajednica ljudi koji surađuju i međusobno pružaju podršku u vidu objavljivanja video zapisa, zapisa na blogovima, kodova i odgovora na pitanja na raznim forumima, što značajno pomaže novim zainteresiranim ljudima i poduzećima koja žele koristiti ove platforme za razvoj novih rješenja [23].

4.1. Raspberry Pi 2

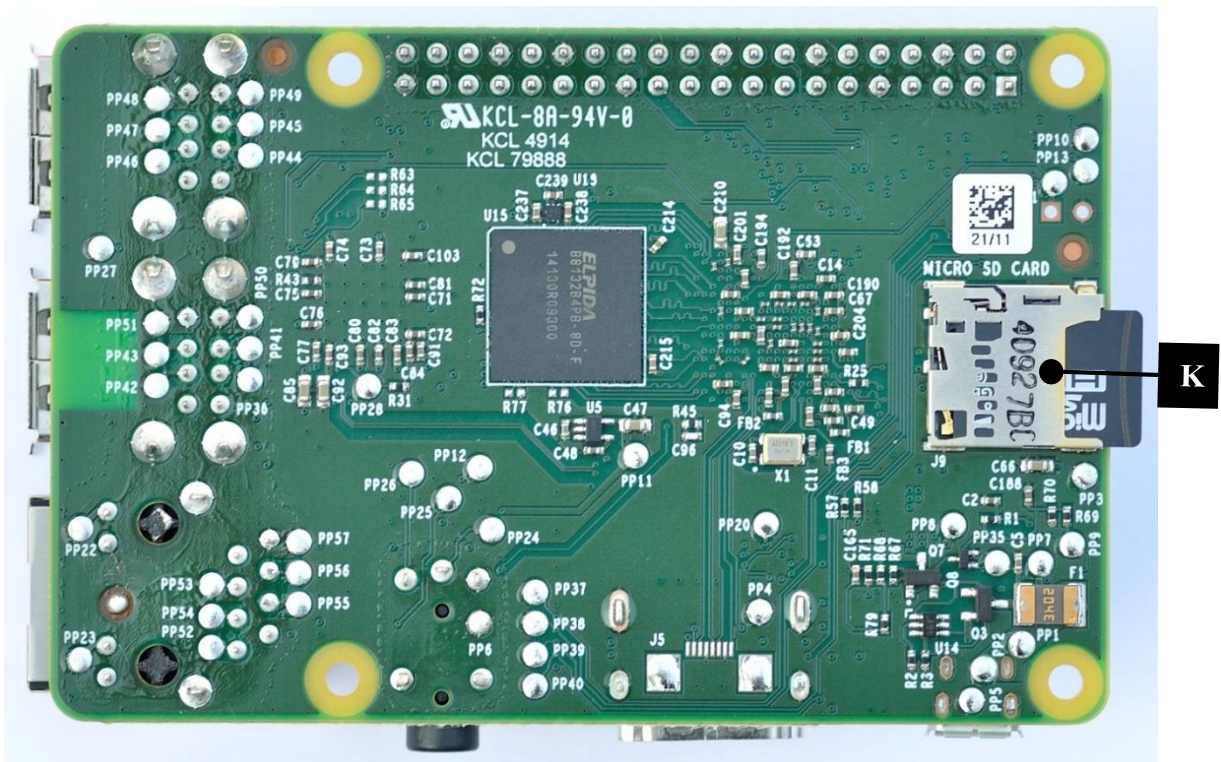
Raspberry Pi predstavlja niz računala na jednoj tiskanoj pločici (eng. *single-board computers*), veličine kreditne kartice, razvijenih u Ujedinjenom Kraljevstvu od strane tvrtke „Raspberry Pi Foundation“ s ciljem pomoći pri učenju računalnih znanosti u školama. Prva verzija računala pojavila se početkom 2012. godine i zvala se Model B, a zatim je došao jednostavniji i jeftiniji Model A. 2014. godine pojavile su se unaprijeđene verzije pod imenom A+ i B+, kao i verzija za ugradnju u proizvode nazvana Compute Module. Model B+ koristi ARM1176JZF-S procesor, brzine 700 MHz i 512 MB RAM, a također ima i 40 priključaka na GPIO (eng. *general purpose input/output*) jedinici, za razliku od 26 na ranijim modelima, kao i 4 USB ulaza i utor za mikro SD karticu, umjesto SD kartice. Model A+ je smanjena verzija Modela B+ te je predviđen za ugradnju u proizvode i projekte koji zahtijevaju malu potrošnju energije. Uz to, modeli A+ i B+ općenito troše manje energije, imaju bolju kvalitetu zvuka i bolji raspored komponenata na pločici (eng. *form factor*) [24].

Početkom 2015. godine, predstavljena je nova generacija Raspberry Pi računala pod nazivom Raspberry Pi 2. U odnosu na Model B+, ova verzija koristi četverojezgreni ARM Cortex-A7 procesor, brzine 900 MHz i raspolaže s 1 GB RAM. Komponente i njihov raspored na pločici su identične onima na Modelu B+, što znači da Raspberry Pi 2 ima:

- 4 USB priključka
- 40 GPIO izvoda
- HDMI izlaz
- Ethernet ulaz
- 3.5 mm kombinirani audio i video izlaz
- Sučelje za kameru (CSI)
- Sučelje za zaslon (DSI)
- Utor za mikro SD karticu
- Broadcom VideoCore IV 3D grafičku jezgru [25]



Slika 13. Gornja strana računala Raspberry Pi 2



Slika 14. Donja strana računala Raspberry Pi 2

A: Procesor

Raspberry Pi 2 koristi isti tip procesora kakav se može naći u uređajima kao što su Iphone 3G i Kindle 2, tako da su njegove mogućnosti usporedive s ovim uređajima. ARM-ovi čipovi općenito se rade u velikom broju arhitektura i s različitim jezgrama prilagođenim za pružanje različitih mogućnosti u različitim cjenovnim rangovima. ARM Cortex-A7 čip je četverojezgreni, 32-bitni, brzine 900 MHz, sustav na čipu, temeljen na ARMv7-A arhitekturi. Manji je, jednostavniji i energetski učinkovitiji u odnosu na prethodnike [26]. Uz to, Raspberry Pi 2 dolazi s 1 GB radne memorije.

B: GPIO (eng. *general-purpose input/output*)

Model Raspberry Pi 2 ima 2×20 izvoda, što je standard još od modela B+. Ovi izvodi su fizičko sučelje između Raspberry-a i okoline, tj. omogućuju Raspberry-ju interakciju s fizičkim svijetom upravljanjem ulazima i izlazima. Najjednostavnije, može ih se promatrati kao prekidače koji se mogu uključivati i isključivati, u slučaju ulaza ili koje Raspberry može uključivati ili isključivati, što je slučaj kod izlaza. Ulazi ne moraju uvijek dolaziti od fizičkog prekidača, nego se mogu prikupljati sa senzora ili signala koji potječe s drugog računala. Izlaz također može biti bilo što, od paljenja LED diode do slanja signala ili podataka drugom uređaju. U slučaju da je Raspberry spojen na mrežu, moguće je iz daljine upravljati uređajima koji su priključeni na njega te dobivati podatke s tih uređaja. 26 od 40 izvoda GPIO-a su izvodi za ulaz i izlaz, dok ostali izvodi daju energiju i uzemljenje. U nastavku će biti objašnjeno kako koristiti izvode GPIO-a za očitavanje podataka sa senzora.

C: Kombinirani analogni video i audio izlaz

Na modelu Raspberry Pi 2, analogni audio i video izlazi su dostupni na standardnom 3.5 mm 4-polnom konektoru.

D: Vanjski USB priključci

Raspberry Pi 2 ima četiri USB 2.0 priključka, za razliku od modela koji su prethodili modelu B+, koji su imali samo dva. Također, pruža bolju podršku za priključivanje dodatnih perifernih uređaja bez značajnih smetnji u radu računala te zaštitu od prevelike struje. U slučaju povećane potrebe perifernog uređaja za energijom, koju ne može zadovoljiti računalo, može se koristiti vanjski izvor energije.

E: Ethernet ulaz

Model Raspberry Pi 2 ima, kao i modeli B i B+, standardni RJ45 Ethernet ulaz. Također, moguće je i Wi-Fi povezivanje na Internet pomoću USB priključka.

F: Priključak za serijsko sučelje kamere (eng. *Camera Serial Interface*, skr. CSI)

Pomoću ovog izlaza moguće je izravno povezati kameru na računalo.

G: HDMI (eng. *High-Definition Multimedia Interface*) izlaz

HDMI konektor omogućava digitalni video i audio izlaz. Računalo podržava četrnaest različitih video rezolucija, a HDMI signal je, pomoću vanjskih adaptera, moguće pretvoriti u DVI (koji koriste mnogi monitori), kompozitni signal (analogni video signal kojeg obično prenosi žuti RCA konektor) ili SCART (europski standard za povezivanje audio-vizualne opreme).

H: Ulaz za napajanje

Na računalima Raspberry Pi nema prekidača za uključivanje, nego se za napajanje koristi mikro USB konektor. On ne predstavlja još jedan USB ulaz, nego služi samo za napajanje. Ova vrsta konektora se koristi jer su jeftini i široko dostupni.

I: Priključak za serijsko sučelje zaslona (eng. *Display Serial Interface*, skr. DSI)

Na ovaj konektor se može priključiti ravni trakasti kabel koji se može koristiti za komunikaciju s LCD ili OLED zaslonima.

J: LED diode za prikaz stanja

Pet LED indikatorskih dioda pružaju vizualne podatke o stanju. LED diode vezane za mrežu nalaze se na samom Ethernet ulazu.

Tablica 1. Popis pet LED dioda za prikaz stanja

Oznaka	Boja	Stanje na koje ukazuje
ACT	zelena	Upali se kada računalo pristupa SD kartici
PWR	crvena	Računalo je priključeno na napajanje napona 3.3 V
FDX	zelena	Upali se ako mrežni adapter može istovremeno i slati i primiti podatke
LNK	zelena	Svjetlo za indicaciju mrežne aktivnosti
100	žuta	Upali se ako je brzina mreže 100 Mbps

K: Utor za SD (eng. *Secure Digital*) karticu

Pošto Raspberry Pi računala nemaju tvrdi disk, sve se pohranjuje na mikro SD karticu. Obzirom da se zalemljeni zglobovi utora za SD karticu mogu oštetiti ako se kartica slučajno savine, dobra je ideja Raspberry Pi staviti u neku vrstu zaštitnog kućišta [27].

4.1.1. Pokretanje računala i namještanje operativnog sustava

Za pokretanje računala Raspberry Pi 2 potrebno nam je isto što i za pokretanje bilo kojeg drugog računala ili laptopa: SD kartica, monitor, Ethernet kabel, tipkovnica, miš i izvor napajanja. Preporuča se SD kartica kapaciteta barem 4 GB, obzirom da najčešće korišteni operativni sustav, Raspbian, zauzima 1.8 GB memorije. Također, na kartici se mora nalaziti program NOOBS (eng. *New Out Of the Box Software*) koji omogućava odabir i instalaciju željenog operativnog sustava. Bilo koji zaslon ili TV koji ima HDMI ili DVI ulaz može poslužiti kao zaslon računala, dok se za pristup Internetu koristi standardni Ethernet kabel. Uz to, s Raspberry Pi-em radi bilo koja tipkovnica i miš s USB priključkom. Za napajanje računala koristi se mikro USB napajanje, napona barem 5V, uz 800 mA struje i snage 4 W. Nedovoljna snaga može uzrokovati čudno ponašanje uređaja.

Nakon prikupljanja sve navedene opreme, potrebno ju je spojiti u računalo (Slika 15) prema sljedećim uputama:

1. Za početak, potrebno je umetnuti SD karticu u utor za SD karticu na računalu, pri čemu ju je nemoguće pogrešno umetnuti.
2. U sljedećem koraku se priključuje tipkovnica i miš u USB priključke računala.

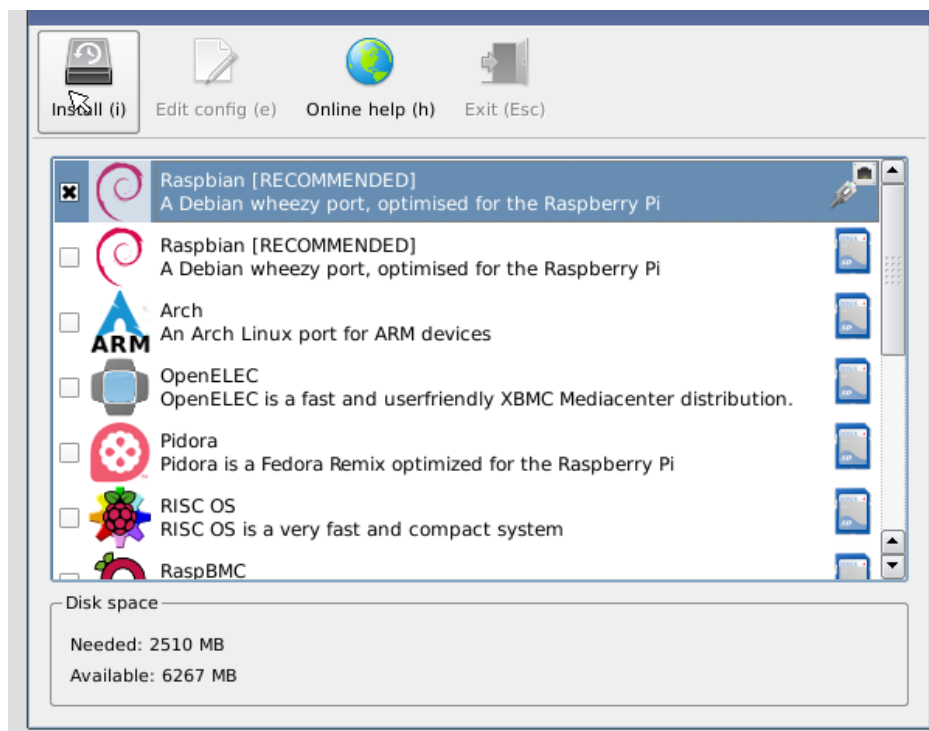
3. Zaslون ili TV mora biti uključen kako bi mogli odabrati ispravan ulaz (pr. HDMI 1, DVI itd.)
4. Zatim treba priključiti HDMI kabel iz računala na zaslon ili TV.
5. Ako nam je potreban Internet, Priključujemo Ethernet kabel u Ethernet ulaz, koji se nalazi pored USB priključaka.
6. Na kraju se priključuje mikro USB napajanje, što rezultira paljenjem i pokretanjem Raspberry Pi računala [28].



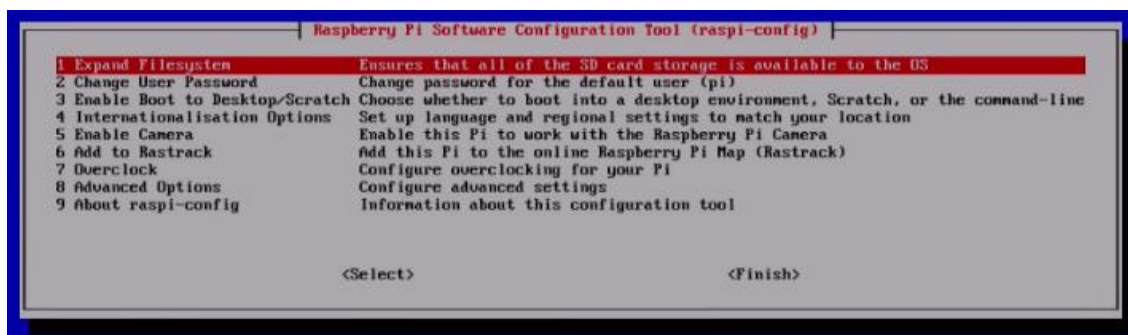
Slika 15. Raspberry Pi 2 sa priključenim svim perifernim jedinicama, Ethernet kabelom i napajanjem

Za rad na Raspberry Pi-u, kao i kod svih računala, potreban je operativni sustav. Kako bi se on lakše instalirao, odmah nakon pokretanja računala, pokreće se i upravitelj za instalaciju NOOBS. Njega je moguće nabaviti ili kupnjom SD kartice s već instaliranim NOOBS-om na službenom web-dućanu „Raspberry Pi Foundation“ ili besplatnim preuzimanjem NOOBS-a i raspakiravanjem dobivene zip. datoteke na praznu, odnosno formatiranu SD karticu. Kod prvog pokretanja računala pojavljuje se prozor sa popisom operativnih sustava koje je moguće instalirati (Slika 16). Raspberry Pi računala primarno koriste operativne sustave temeljene na Linux-u, a najavljeno je da će Raspberry Pi 2 moći koristiti i vlastitu verziju Windows 10 operativnog sustava. Ipak, trenutno najčešće korišten i operativni sustav preporučan od strane „Raspberry Pi Foundation“ je Raspbian. Za njegovu instalaciju potrebno je samo označiti kućicu s lijeve strane i kliknuti ikonu „Install“. Nakon završetka procesa instalacije, pokreće se

izbornik za konfiguraciju (raspi-config) Raspberry Pi-a (Slika 17) [29]. Ovdje je moguće namjestiti vrijeme i datum za određenu regiju, promijeniti lozinku korisnika (zadano korisničko ime je „pi“, a lozinka „raspberry“), promijeniti postavke vezane za jezik i regionalne postavke, omogućiti Pi-u da radi s Raspberry Pi kamerom, povećati brzinu procesora (eng. *overclock*) itd. [30] Izbornik za konfiguraciju je moguće pokrenuti bilo kada upisivanjem „sudo raspi-config“ u naredbenu liniju operativnog sustava. „Sudo“ je program za računalne operativne sustave slične Unix-u, koji omogućava korisnicima pokretanje programa sa sigurnosnim dopuštenjima drugog korisnika, uključujući administratora sustava.



Slika 16. Prozor s popisom operativnih sustava koje je moguće instalirati



Slika 17. Prozor s izbornikom za konfiguraciju

4.2. Akcelerometar MPU-6050

MPU-6050, proizvođača InvenSense, je prvo na svijetu rješenje za mjerenje pokreta, s integriranim 9-osnim spojem senzora, koje se koristi u smartpone-ima, tabletima, daljinskim upravljačima koji upravljaju pokretima i drugim potrošačkim uređajima. Uređaj ima ugrađen troosni MEMS žiroskop i troosni MEMS akcelerometar, zajedno sa procesorom za digitalnu obradu pokreta (eng. *Digital Motion Processor*, skr. DPM), koji služi kao pojačalo te pomoćnim I²C priključkom na koji se mogu priključiti različiti digitalni senzori. Na ovaj način, MPU-6050 na izlazu daje kompletan prikaz gibanja preko primarnog I²C ili SPI izlaza, tj. kombinira akceleraciju i rotacijsko gibanje u jedinstveni tok podataka. Ovakva integracija tehnologija omogućuju smanjenje resursa potrebnih za obradu podataka te smanjenu cijenu u odnosu na rješenja sa zasebnim žiroskopom i akcelerometrom.

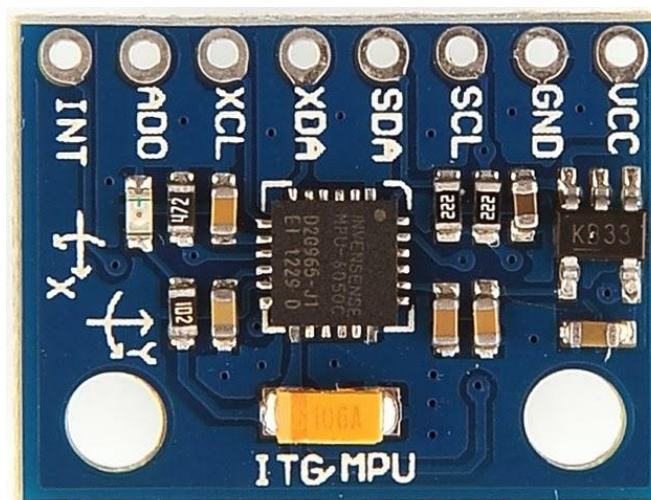
Značajka MPU-6050 senzora su tri 16-bitna pretvornika analognog u digitalni signal (eng. *Analog-to-digital converter*, skr. ADC), za digitalizaciju izlaza žiroskopa i tri 16-bitna ADC-a za digitalizaciju izlaza akcelerometra, koji omogućavaju istovremeno prikupljanje podataka svih osi žiroskopa i akcelerometra. Za precizno mjerenje brzih i sporih kretnji, korisnik može programirati žiroskop u rasponu ± 250 , ± 500 , ± 1000 i ± 2000 °/s (eng. *degrees per second*, skr.dps), a akcelerometar u rasponu $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$ i $\pm 16g$. 1024-bitni FIFO (eng. *first in first out*) međuspremnik na čipu pomaže u smanjenju potrošnje energije sustava tako što omogućava procesoru da odjednom očita podatke sa senzora te da zatim uđe u niskoenergetski način rada, za vrijeme kada glavni procesor (MPU) prikuplja dodatne podatke. MPU-6050 u potpunosti na čipu podržava različite aplikacije temeljene na pokretu, zbog činjenice da se na čipu nalaze sve senzorske komponente i komponente za obradu. Također, ovime se omogućava niskoenergetska obrada pokreta kod prijenosnih aplikacija sa smanjenim zahtjevima za obradom koji se postavljaju na procesor sustava. Komunikacija sa svim registrima uređaja se obavlja korištenjem I²C veze, pri brzini 400 kHz. Dodatne mogućnosti uključuju ugrađeni senzor temperature te oscilator na čipu, sa $\pm 1\%$ varijacije u temperaturnom rasponu.

Veličina senzora je samo 4x4x0.9 mm, uz visoke performanse i nisku cijenu, što ga čini idealnim za korištenje u potrošačkoj elektronici. Uz to, uređaj ima toleranciju na udarce od 10000g te programabilne filtre niskih frekvencija za žiroskop i akcelerometar. Što se tiče izvora napajanja, MPU-6050 radi u rasponu napona od 2.375 V do 3.46 V [31]. U Tablici 2 dani su registri senzora korišteni u projektu [32].

Tablica 2. Registri senzora korišteni u projektu

Adresa (Hex)	Adresa (Dec)	Ime registra	Opis
1C	28	ACCEL_CONFIG	Registar služi za regulaciju osjetljivosti. Ovisno o željenoj osjetljivosti akcelerometra upisuju se heksadecimalne vrijednosti ($\pm 2g = 0x00$, $\pm 4g = 0x01$, $\pm 8g = 0x10$, $\pm 16g = 0x11$)
3B	59	ACCEL_XOUT_H	Registar pohranjuje najnovije mjerenje ubrzanja u smjeru osi X
3D	61	ACCEL_YOUT_H	Registar pohranjuje najnovije mjerenje ubrzanja u smjeru osi Y
3F	63	ACCEL_ZOUT_H	Registar pohranjuje najnovije mjerenje ubrzanja u smjeru osi Z
6B	107	PWR_MGMT_1	Registar omogućuje korisniku odabir moda rada (DEVICE_RESET, SLEEP, CYCLE, TEMP_DIS, CLKSEL)

Pri izradi projekta korišten je modul GY-521 koji koristi akcelerometar MPU-6050 (Slika 18). Modul dolazi sa ravnim i kutnim konektorom, od kojih je jedan potrebno zalemiti. Općenito, ako se akcelerometar namjerava staviti na breadboard, koristi se ravni konektor, a ako će se koristiti samostalno, bolje je zalemiti kutni konektor jer je u tom slučaju lakše postaviti akcelerometar na uređaj koji se ispituje.



Slika 18. GY-521 modul s MPU-6050 digitalnim akcelerometrom

4.3. Izrada sustava za mjerenje vibracija

Kao što je već spomenuto, cijena komercijalnih uređaja za mjerenje vibracija kreće se od nekoliko stotina do nekoliko tisuća dolara. Ovakvi uređaji su precizni i pouzdani te često pružaju mogućnosti analitike na licu mjesta, no najčešće ne predstavljaju najučinkovitije i najpovoljnije rješenje. Naime, u današnje vrijeme objekata povezanih preko Interneta, cilj je imati velik broj malih, jeftinih, energetske učinkovitih, fleksibilnih i mobilnih uređaja za prikupljanje podataka, povezanih sa računalnim sustavom za upravljanje održavanjem. Ovakva rješenja postala su dostupna i isplativa tek prije nekoliko godina, jer su performanse računalnih sustava, uslijed napretka tehnologije, rasle, dok su se njihove dimenzije, energetske potrebe i cijena smanjivale. Uz to, povezivanje preko Interneta omogućilo je nadzor i upravljanje uređajima za prikupljanje podataka iz daljine, kao i prikaz, prikupljanje i pohranu podataka na jednom mjestu, tj. tamo gdje se donose odluke. Isto tako, pojavile su se nove metode i tehnologije obrade velike količine strukturiranih i nestrukturiranih podataka koje prikupljaju senzori, poznatije pod nazivom rudarenje podataka. Na ovaj način, radnici zaduženi za održavanje štede na vremenu jer ne trebaju obilaziti strojeve koje žele nadzirati, nego potrebne podatke o stroju dobivaju u realnom vremenu, tamo gdje se nalaze. Također, metodama rudarenja podataka i prediktivne analitike, mogu uočavati trendove i predviđati kvarove strojeva, tj. dobiti točan uvid na kojim mjestima i nakon koliko vremena uobičajeno dolazi do pojave kvara.

U nastavku je, korak po korak, opisan način na koji se, uz vrlo prihvatljivu cijenu, može izraditi sustav za pouzdano prikupljanje i pohranu podataka o vibracijama. Sastoji se od računala Raspberry Pi 2 i digitalnog akcelerometra MPU-6050, koji se nalazi na modulu naziva GY-521, a ukupna cijena sustava je manja od 50 dolara. Sustav prikuplja podatke o ubrzanju vibrirajućeg uređaja u sve tri osi te ima mogućnost računanja ukupnog (rezultantnog) ubrzanja. Podatke može prikupljati bežično, primjerice preko Wi-Fi protokola ili žicom, što je ovdje konkretno slučaj jer korišteni senzor nema vlastiti izvor napajanja. Prikupljeni podaci se pohranjuju na SD karticu računala i mogu se prenijeti na moćniji PC ili poslužitelj na analizu. Podaci se mogu slati na analizu s bilo koje točke koja ima Wi-Fi, GSM ili neku drugu bežičnu vezu na Internet. Analiza bi se dijelom mogla provesti i na samom Raspberry-ju, no moćnije računalo će je provesti brže i efikasnije. Također, ovim sustavom može se jednostavno upravljati ako je, primjerice, potrebno izmijeniti postavke mjerenja promjenom osjetljivosti akcelerometra ili učestalosti prikupljanja podataka. Uz to, sustav može biti u interakciji s uređajem pa tako može oglasiti alarm, ugaziti uređaj itd.

4.3.1. Povezivanje računala i senzora

Navedene postavke se odnose na korištenje operativnog sustava Raspbian. Modul GY-521 za komunikaciju koristi I²C vezu pa se prije samog povezivanja senzora na računalo, prema potrebi, instaliraju relevantni driveri za Linux. Najprije se otvara naredbena linija Linuxa (Menu / Accessories / Terminal) u koju se upisuje:

```
sudo vi /etc/modules
```

Na kraju datoteke se upisuju linije dane ispod, datoteka se spremi i računalo se ponovno pokrene.

```
i2c-bcm2708  
i2c-dev
```

Zatim se provjerava „blacklist“ datoteka. U toj datoteci se nalaze izvodi GPIO-a koji su uobičajeno isključeni, a I²C veza može biti jedna od njih. Datoteka se provjerava tako da se ponovno otvori naredbena linija i upiše:

```
sudo vi /etc/modprobe.d/raspi-blacklist.conf
```

Ako se u datoteci nalaze linije dane ispod, moraju se komentirati tako da se na početku linije postavi znak „#“:

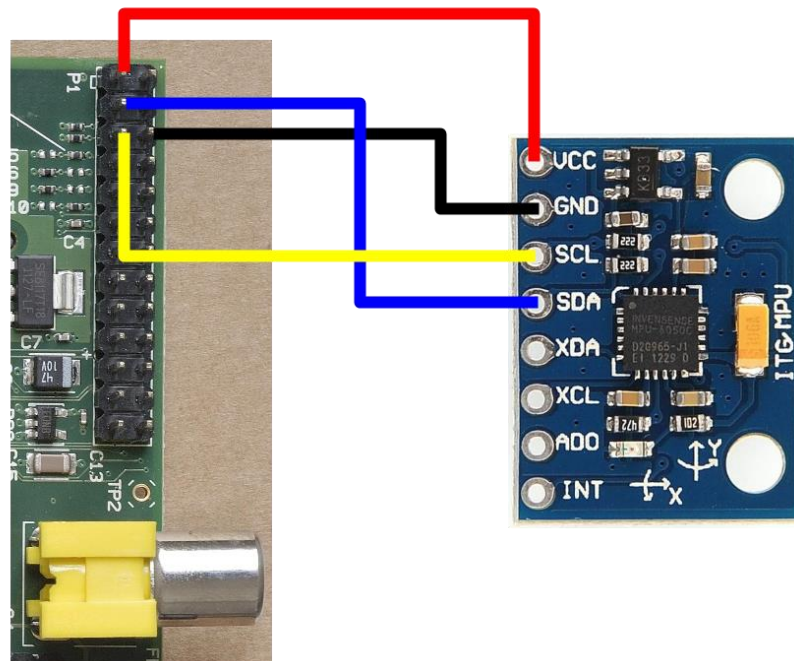
```
#blacklist spi-bcm2708  
#blacklist i2c-bcm2708
```

Nakon uređivanja postavki, spaja se senzor korištenjem GPIO izvoda računala. Spajanje se radi sa žicama koje imaju ženske konektore s obje strane. Koriste se samo četiri izvoda (Slika 19) na koje senzor mora biti spojen kako je prikazano na slici 20.

- Pin 1 – 3.3V spaja se na VCC
- Pin 3 – GPIO2 se spaja na SDA
- Pin 5 – GPIO3 se spaja na SCL
- Pin 6 – uzemljenje se spaja na GND



Slika 19. Brojevi korištenih izvoda GPIO-a



Slika 20. Prikaz ispravnog spajanja senzora na izvode računala

Kada je senzor spojen, dobro je testirati je li ga računalo prepoznalo. To se radi naredbom danom ispod, kojom se instaliraju I²C alati:

```
sudo apt-get install i2c-tools
```

Zatim se upisuje:

```
sudo i2cdetect -y 1
```

Ovime se dobiva izlaz koji prikazuje sve uređaje spojene na računalo preko I²C veze i njihove adrese:

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	a	b	c	d	e	f
00:			--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
10:	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
20:	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
30:	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
40:	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
50:	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
60:	--	--	--	--	--	--	--	--	68	--	--	--	--	--	--	--
70:	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Vidljivo je da je računalo uočilo senzor s adresom 0x68 (heksadecimalan broj), koju je nužno znati za interakciju sa senzorom.

4.3.2. Prikupljanje podataka sa senzora

Prikupljanje podataka se vrši pomoću programa napisanog u programskom jeziku Python. Kako bi Python mogao čitati podatke preko I²C veze, mora se instalirati „smbus“ modul:

```
sudo apt-get install python-smbus
```

Kod programa za prikupljanje i pohranu podataka te njegovo objašnjenje dani su u nastavku:

```
#!/usr/bin/python

import smbus      }
import math      } A
import time      }

# Power management registers
power_mgmt_1 = 0x6b      }
accel_config = 0x1c      } B

def read_byte(adr):
    return bus.read_byte_data(address, adr)

def read_word(adr):
    high = bus.read_byte_data(address, adr)
    low = bus.read_byte_data(address, adr+1)
    val = (high << 8) + low
    return val      } C
```

```

def read_word_2c(adr):
    val = read_word(adr)
    if (val >= 0x8000):
        return -((65535 - val) + 1)
    else:
        return val
}
D

bus = smbus.SMBus(1)
address = 0x68
}
E

# Now wake the 6050 up as it starts in sleep mode
bus.write_byte_data(address, accel_config, 0x11)
bus.write_byte_data(address, power_mgmt_1, 0)
}
F

logfile=open('akceleracije.txt','w')
}
G

t=0
}
G

print 'start'
}
G

for i in range(2000):
}
H

    accel_xout = read_word_2c(0x3b)
    accel_yout = read_word_2c(0x3d)
    accel_zout = read_word_2c(0x3f)
    accel_xout_scaled = accel_xout / 4096.0
    accel_yout_scaled = accel_yout / 4096.0
    accel_zout_scaled = accel_zout / 4096.0
}
H

    rez_scaled = math.sqrt( (accel_xout_scaled *
accel_xout_scaled) + (accel_yout_scaled *
accel_yout_scaled) + (accel_zout_scaled *
accel_zout_scaled))
}
I

# zaokruzivanje
    accel_xout_scaled=round(accel_xout_scaled,3)
    accel_yout_scaled=round(accel_yout_scaled,3)
    accel_zout_scaled=round(accel_zout_scaled,3)
}
I

    rez_scaled=round(rez_scaled,3)
}
I

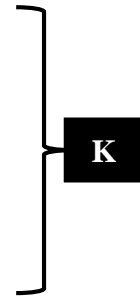
# za ispis u datoteku
    ax=str(accel_xout_scaled)
    ay=str(accel_yout_scaled)
    az=str(accel_zout_scaled)
    rez=str(rez_scaled)
    timel=str(t)
}
J

    print "accel_xout: ", accel_xout_scaled
    print "accel_yout: ", accel_yout_scaled
    print "accel_zout: ", accel_zout_scaled
}
J

```

```
print "rez_scaled: ", rez_scaled
logfile.write(time1+', '+ax+', '+ay+', '+az+', '
+rez+', '+'\n')
time.sleep(0.005)
t=t+0.005
t=round(t,3)

logfile.close()
```



- A:** Na početku se uvoze moduli (eng. *library*) za komunikaciju preko I²C veze (smbus), matematičke operacije (math) te vrijeme (time).
- B:** Definiiraju se registri za pokretanje senzora (0x6b) i promjenu osjetljivosti akcelerometra (0x1c).
- C:** Python-ove naredbe za čitanje registara senzora. „address“ predstavlja adresu uređaja, a „adr“ adresu registra iz kojeg se očitavaju podaci. I²C komunikacija može čitati samo 8 bitova pa kod 16 bitne komunikacije mora čitati dva registra koje zatim spaja. Prvo na „high“ čita jedan registar (adr), a zatim na „low“ sljedeći (adr+1).
- D:** Akcelerometar mjeri sirove podatke u rasponu ±32768 (hex 0x8000) za svaku os. Funkcija „if, else“ omogućava dobivanje i pozitivnih i negativnih vrijednosti sirovih podataka.
- E:** Naredba za komunikaciju preko I²C veze (smbus) i adresa uređaja (0x68).
- F:** Promjena osjetljivosti (accel_config) mora se napisati prije pokretanja senzora (power_mgmt_1). Moguće osjetljivosti dane su u Tablici 2.
- G:** Stvara se datoteka „akceleracije.txt“ u koju se zapisuju vrijednosti koje je akcelerometar prikupio. Na početku se vrijeme postavlja na 0 i ispisuje se „start“.
- H:** Radi se „for“ petlja kojoj se može mijenjati broj koraka pa o tome, uz veličinu koraka, ovisi koliko dugo će trajati prikupljanje podataka. Zatim se čitaju registri u kojima se nalaze podaci o akceleraciji u svim osima akcelerometra (0x3b, 0x3d, 0x3f). Sirovi podaci se potom skaliraju, tj. pretvaraju se u g (broj kojim se dijele ovisi o osjetljivosti akcelerometra).
- I:** Rezultantno ubrzanje dobiva se preko formule: $rez_scaled = \sqrt{ax^2 + ay^2 + az^2}$. Zatim se provodi zaokruživanje skaliranih vrijednosti i rezultante na tri decimale.

- J:** Zaokružene vrijednosti i vrijednost vremena se pretvaraju u brojčane vrijednosti (string). Potom se dobivene vrijednosti prikazuju u naredbenoj liniji.
- K:** U naredbenoj liniji se prikazuju i rezultatne vrijednosti. Sve navedene vrijednosti se zapisuju u datoteku „akceleracije.txt“. Mjerenje počinje nakon 5 milisekundi i očitavanje vrijednosti ubrzanja se provodi svakih 5 milisekundi, što se može smanjiti ako se želi povećati frekvencija očitavanja podataka. Vrijeme se također zaokružuje na tri decimale. Na kraju se zatvara datoteka u koju se upisuju dobivene vrijednosti.

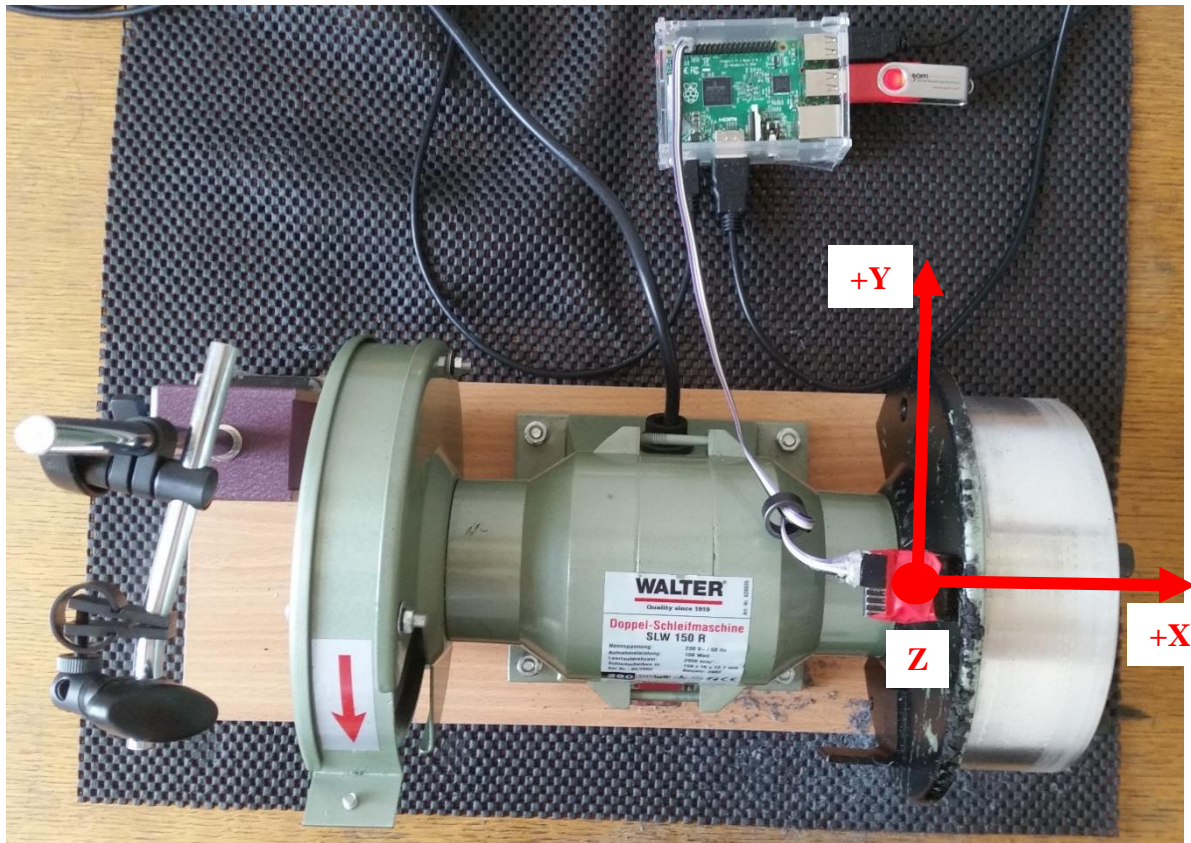
4.3.3. Provedba i rezultati mjerenja vibracija

Mjerenje vibracija je provedeno na simulatoru vibracija prikazanom na slici 21. Na slici je također vidljivo da je senzor postavljen na uređaj lijepljenjem i da je žicom povezan na računalo. Na temelju koda prikazanog ranije, vidljivo je da je vrijeme prikupljanja podataka iznosilo 10 sekundi. Naime, veličina intervala u kojima se prikupljaju podaci je 5 milisekunda, a u „for“ petlji je ukupno 2000 intervala. Iz istih podataka može se zaključiti i da frekvencija prikupljanja podataka iznosi 200 Hz. Osjetljivost senzora postavljena je na $\pm 16g$ i definira se u kodu prije pokretanja senzora. Za pokretanje programa, u naredbenu liniju operativnog sustava upisuje se naredba za pokretanje:

```
sudo python ime_programa.py
```

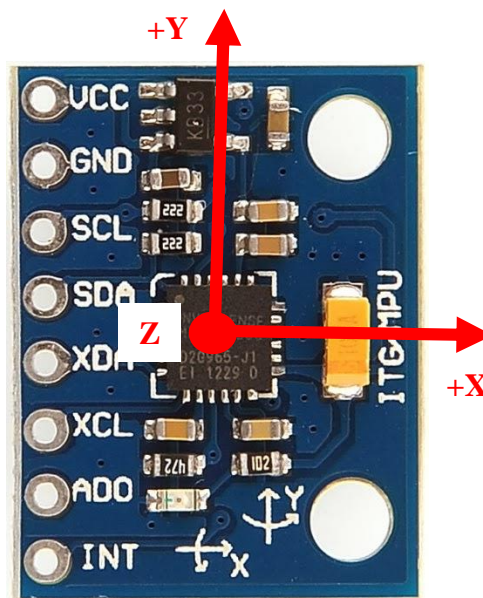
Moguće je da se prije pokretanja programa mora promijeniti direktorij u kojem se on nalazi. Ako se program nalazi, primjerice, na radnoj površini (eng. *Desktop*), to se radi upisivanjem sljedeće naredbe u naredbenu liniju (cd – *change directory*):

```
cd Desktop
```



Slika 21. Uređaj za simulaciju vibracija na koji je pričvršćen akcelerometar

Orijentacija osi akcelerometra prikazana je na slici 22. Vidljivo je da os X mjeri vibracije u aksijalnom, dok os Y mjeri vibracije u radijalnom smjeru. Os Z mjeri vibracije u vertikalnom smjeru. Poznavanje točnih orijentacija osi akcelerometra je bitno kod tumačenja rezultata mjerenja.



Slika 22. Orijentacija osi akcelerometra

Rezultati mjerenja ispisuju se u naredbenoj liniji operativnog sustava te se istovremeno pohranjuju u datoteku „akceleracije.txt“, tj. na SD karticu računala. Kao rezultat, ispisuje se i pohranjuje vrijeme, u intervalima od 5 milisekundi, iznosi akceleracija u sve tri osi u g i iznos rezultantne akceleracije, također u g. Nakon završetka mjerenja, datoteka „akceleracije.txt“ mora se preimenovati jer će računalo prilikom sljedećeg mjerenja zapisivati podatke u istu datoteku, preko postojećih podataka. Slika 23 prikazuje neke podatke dobivene mjerenjem.

t	ax	ay	az	rez
0.005	0.953	-0.14	4.89	4.984
0.01	0.808	0.222	5.82	5.88
0.015	0.263	-1.196	4.783	4.938
0.02	0.217	-1.006	3.731	3.871
0.025	1.537	-0.265	4.502	4.764
0.03	1.323	-0.45	5.415	5.593
0.035	0.52	-1.045	3.532	3.72
0.04	0.772	0.2	4.859	4.924
0.045	0.772	0.479	5.611	5.685
0.05	1.668	0.414	5.459	5.723
0.055	0.615	-1.341	4.329	4.574
0.06	0.289	-0.672	4.006	4.072
0.065	0.83	0.129	4.788	4.861
0.07	0.456	0.218	5.231	5.256
0.075	0.354	-0.783	4.909	4.984
0.08	0.29	-1.384	3.458	3.736
0.085	0.023	-1.057	3.585	3.738
0.09	1.02	0.864	5.33	5.495
0.095	1.242	0.312	5.308	5.46
0.1	0.042	-1.007	4.085	4.207
0.105	0.648	-0.34	3.949	4.017
0.11	0.586	0.124	5.296	5.33
0.115	1.0	0.058	4.63	4.737
0.12	-0.422	-0.106	4.609	4.63
0.125	1.758	0.214	4.598	4.927
0.13	-0.288	-0.064	5.13	5.138
0.135	-0.497	-1.266	4.16	4.377
0.14	1.265	-0.159	3.949	4.15
0.145	-0.013	0.069	5.128	5.128

Slika 23. Prikaz dijela sadržaja datoteke mjerenja vibracija

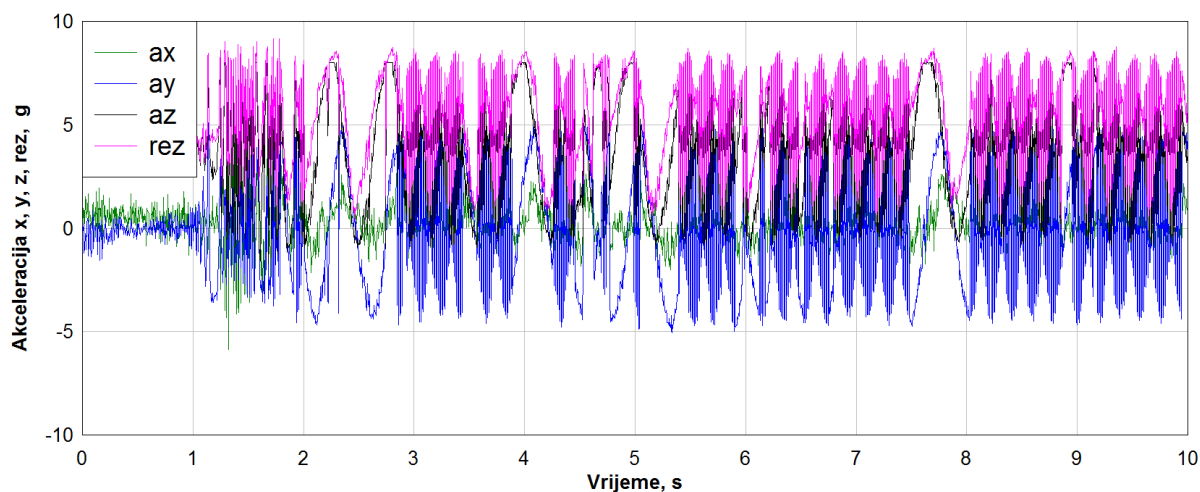
4.3.4. Analiza dobivenih podataka

Analiza podataka provedena je na PC-u, pomoću programa DPlot, koji služi za izradu grafova i manipulaciju 1, 2, 3 i 4-D podacima. Program je vrlo jednostavan za korištenje te je podatke moguće učitati povlačenjem tekstualne datoteke. Osim grafičkog prikaza, program omogućava i provođenje brze Fourierove transformacije podataka o vibracijama u smjeru svih osi, čime se dobiva frekvencijski spektar i informacija na kojim frekvencijama su amplitude vibracija najveće.

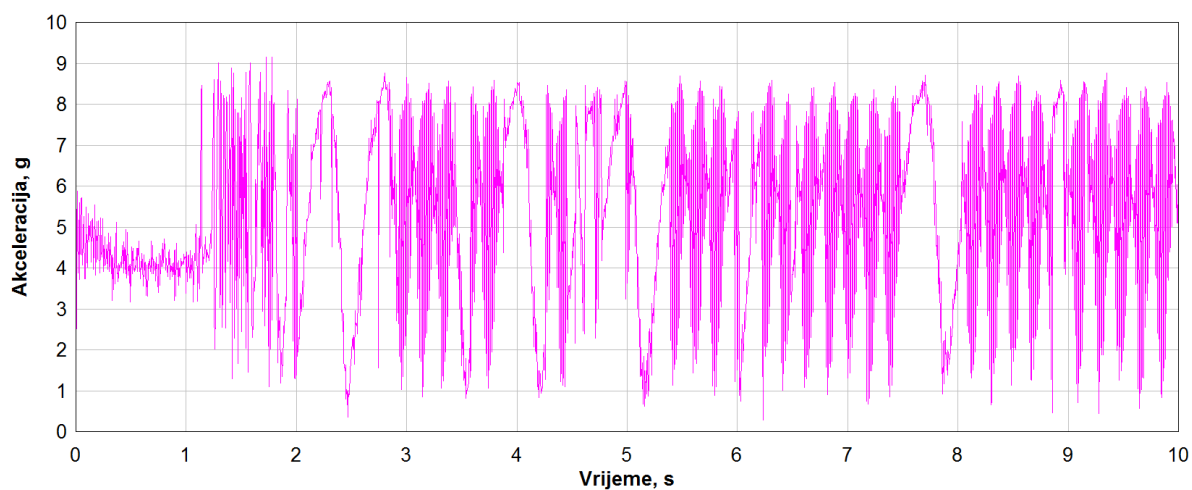
Grafički prikaz izlaznih vrijednosti akcelerometra (Slika 24) obično se ne koristi za analizu. Ubrzanje se može izraziti u m/s^2 ili gravitacijskim jedinicama, s tim da 1g otprilike iznosi $9,81 \text{ m/s}^2$. Ako se želi znati ukupna brzina vibracija, ona se može izračunati integracijom signala ubrzanja. Isto tako, amplituda pomaka se računa dvostrukom integracijom signala ubrzanja. Pomaci se uvijek izražavaju u mikrometrima kao „*peak-to-peak*“, tj. amplituda od vrha do vrha je udaljenost od negativnog do pozitivnog vrha.

Računanjem frekvencijskog spektra, vremenska domena se, brzom Fourierovom transformacijom, pretvara u frekvencijsku kako bi se vidjelo odakle dolazi energija vibracija. Analiza frekvencija je temelj analize vibracija i omogućava rješavanje većine problema vezanih za pojavu vibracija na strojevima, uključujući pronalaženje uzroka vibracija, planiranje popravka uz minimalan prekid rada stroja, djelovanje nakon manjeg kvara u ranijoj fazi, postizanje usklađenog rada stroja i dulje vrijeme između kvarova [33].

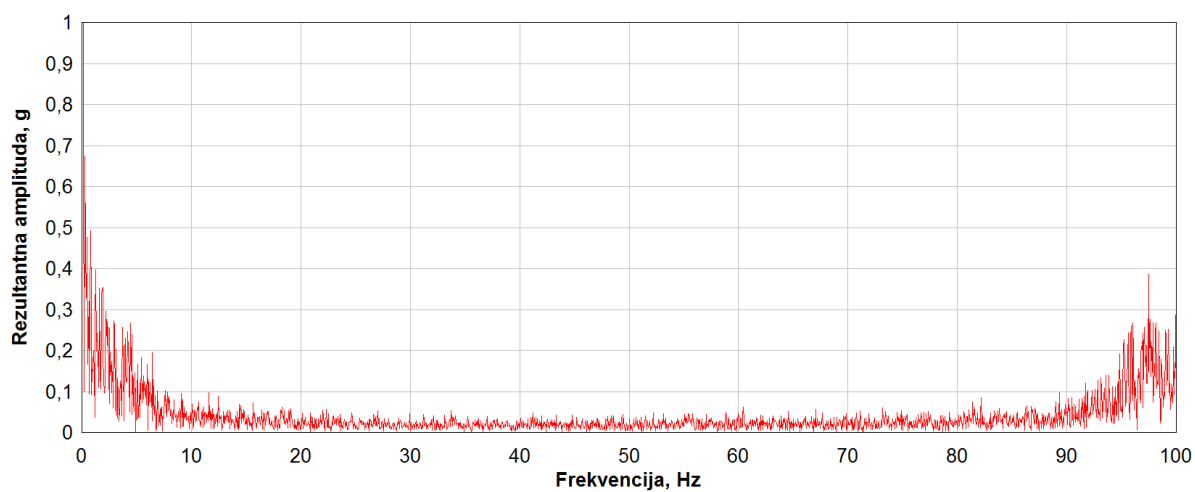
Prije same analize izmjerenih podataka, provodi se referentno mjerenje pri maksimalnoj brzini rotacije. U ovom slučaju, maksimalna brzina iznosi 2950 min^{-1} (okretaja u minuti), a vrijeme mjerenja je 15 sekundi. Iz maksimalne brzine dobivamo da minimalna frekvencija prikupljanja podataka mora biti 50 Hz (iz koda je vidljivo da je frekvencija prikupljanja podataka u ovom slučaju 200 Hz jer se prikupljaju svakih 5 milisekundi). Slika 26 prikazuje frekvencije na kojima se pojavljuju vibracije pri maksimalnoj brzini vrtnje, dobivene brzom Fourierovom transformacijom. Slike u nastavku prikazuju grafički prikaz izmjerenih podataka te brzu Fourierovu transformaciju vibracija u svim osima i rezultatnih vibracija.



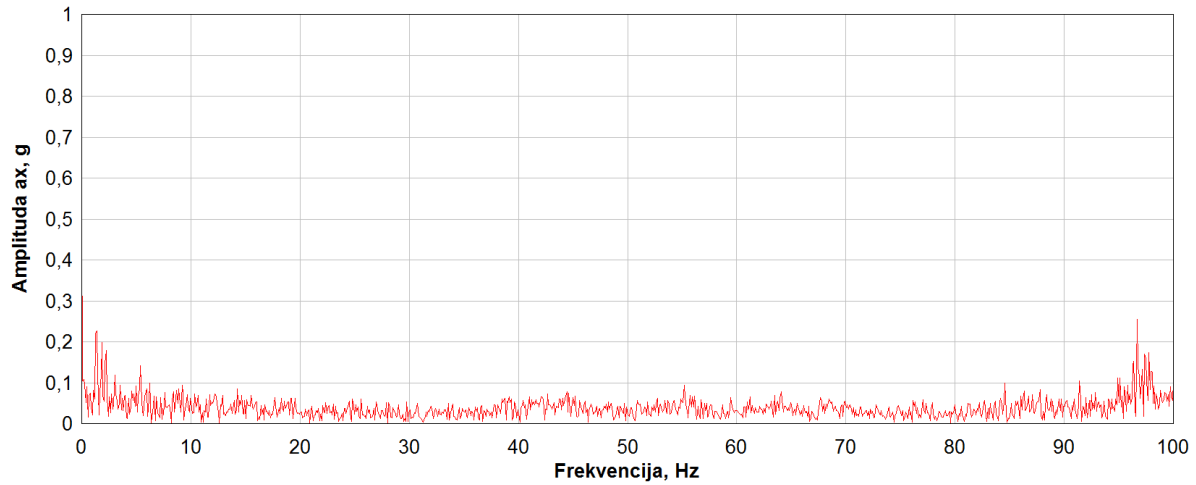
Slika 24. Grafički prikaz izmjerenih podataka o vibracijama u smjeru svih osi s rezultantom u vremenskoj domeni



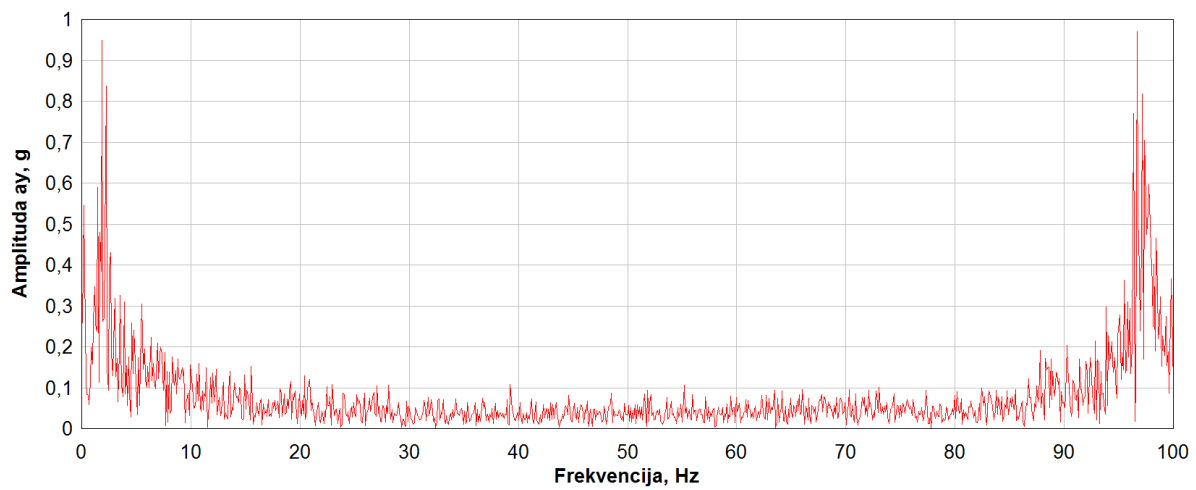
Slika 25. Grafički prikaz podataka o rezultatnim vibracijama u vremenskoj domeni



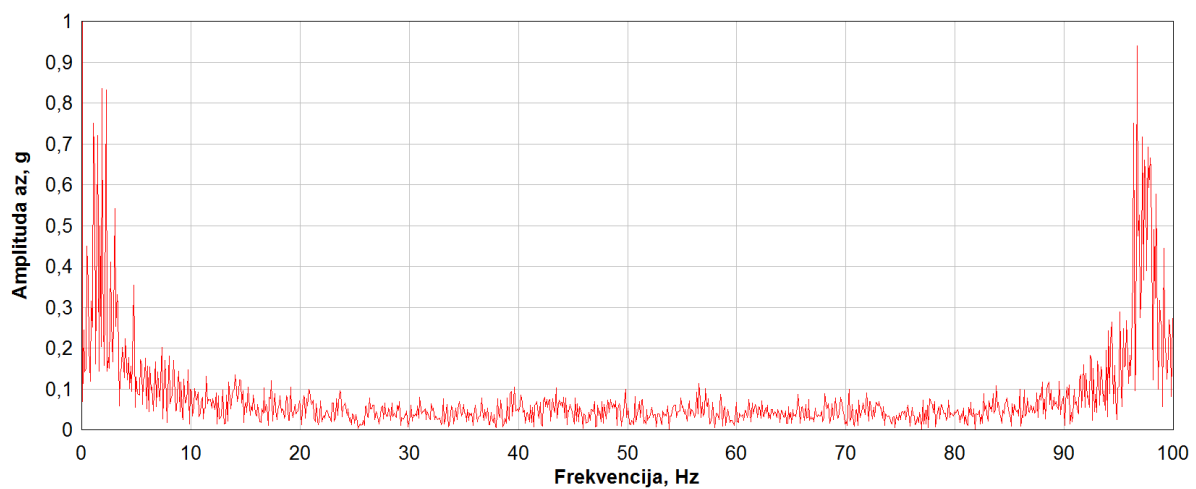
Slika 26. Frekvencijski spektar rezultatnih vibracija pri maksimalnoj brzini vrtnje



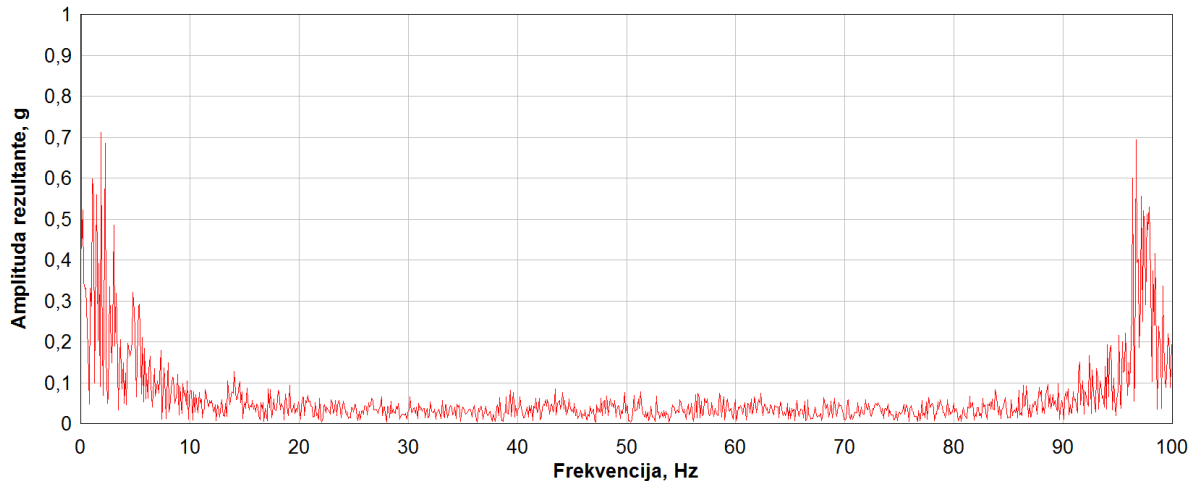
Slika 27. Frekvencijski spektar vibracija u smjeru osi X



Slika 28. Frekvencijski spektar vibracija u smjeru osi Y

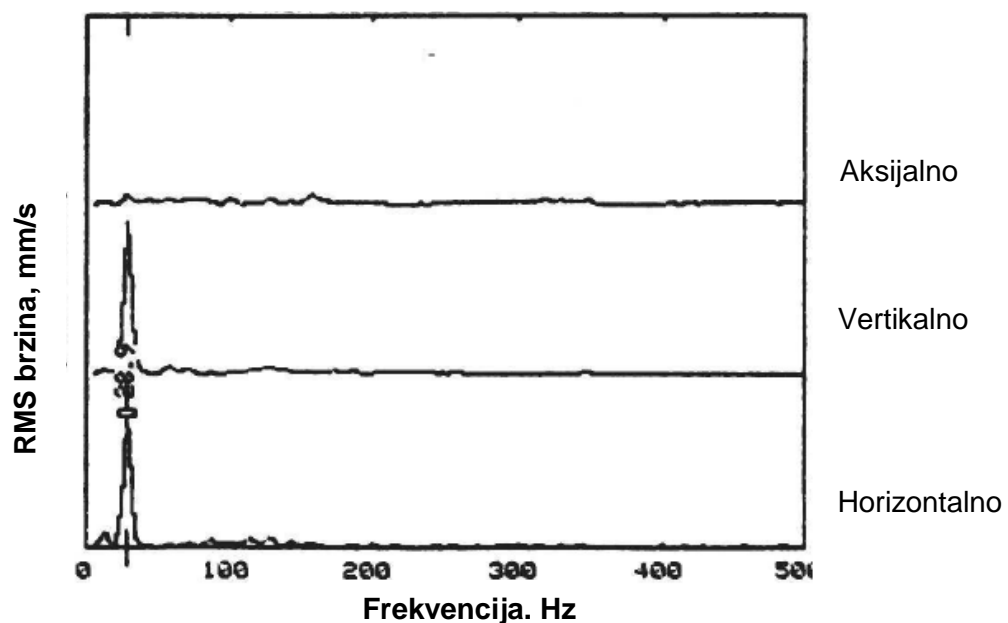


Slika 29. Frekvencijski spektar vibracija u smjeru osi Z



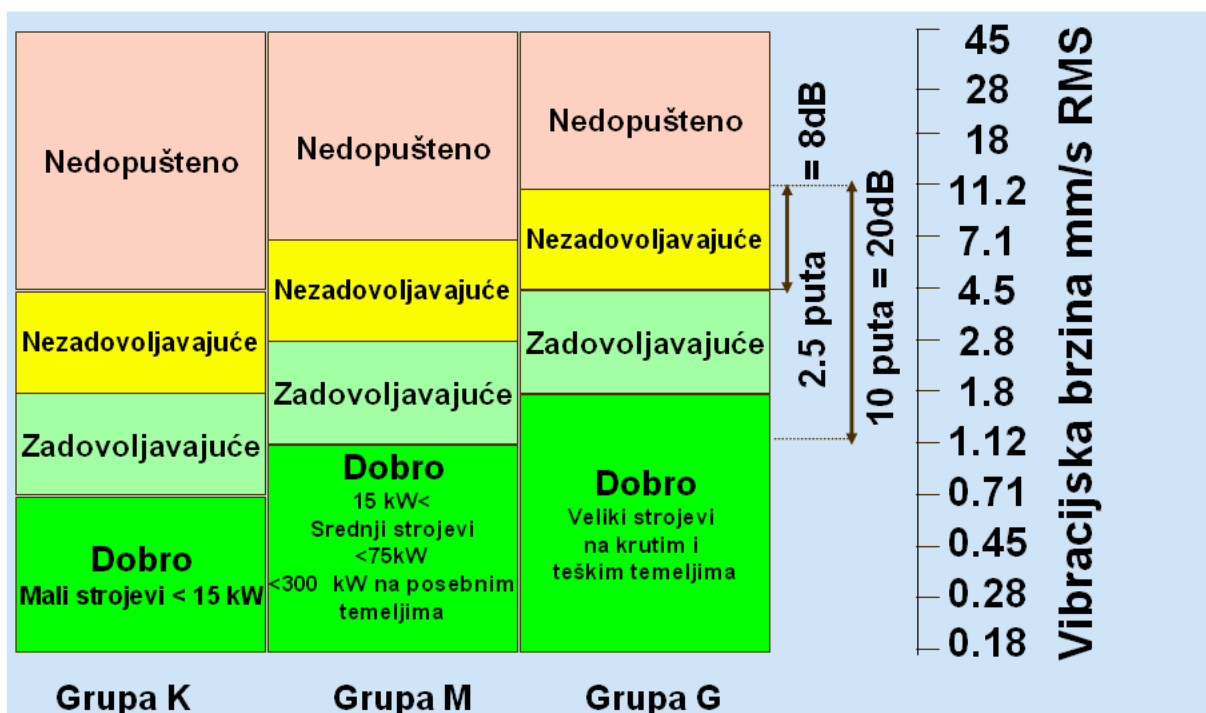
Slika 30. Frekvencijski spektar rezultantnih vibracija

Slika 24 prikazuje vibracije u smjeru svih osi, a slika 25 rezultantne vibracije, izmjerene tijekom 10 sekundi. Vidljivo je da prikaz vibracija u smjeru osi Z i rezultantnih vibracija započinje od 1g zbog djelovanja gravitacije. Frekvencijski spektar, koji se dobiva nakon brze Fourierove transformacije, pokazuje na kojim frekvencijama su amplitude vibracija najveće. Iz slike 27 može se uočiti da vibracije u aksijalnom smjeru (os X) imaju najmanju amplitudu. Vibracije u smjeru osi Y (Slika 28) imaju gotovo pet, a vibracije u smjeru osi Z (Slika 29) četiri puta veću amplitudu pa se može zaključiti da upravo vibracije u navedenim smjerovima najviše doprinose ukupnim (rezultantnim) vibracijama (Slika 30).



Slika 31. Tipičan troosni spektar neuravnoteženog stroja [34]

Iako karakteristike određenog defekta mogu značajno varirati ovisno o tipu stroja, brzini ili opterećenju, dugogodišnjim iskustvom analiza vibracija utvrđene su vibracijske karakteristike različitih vrsta kvarova. Slika 31 prikazuje dijagram na kojem je prikazan tipičan troosni spektar neuravnoteženog stroja. Vidljivo je da su vertikalna i horizontalna amplituda slične te da je aksijalna amplituda niska. Upravo je ovakav troosni spektar dobiven frekvencijskom analizom ispitivanog uređaja pa se sa sigurnošću može zaključiti da je uzrok vibracija neuravnoteženost, tj. debalans [34].



Slika 32. Procjena vibracijskog stanja sustava prema ISO 7919 [35]

Slika 32 prikazuje klasifikaciju uređaja obzirom na njihovu veličinu i RMS (eng. *Root Mean Square*) vibracijsku brzinu, prema ISO 7919 standardu. Ovaj standard se odnosi upravo na uređaje sa rotirajućim osovinama [35]. Promatrani uređaj ima snagu 150 W pa spada u K grupu uređaja. Vibracijsku brzinu najbrže možemo izračunati preko specijalizirane internetske aplikacije, tako da se upiše frekvencija i najveće ubrzanje. Poveznica na aplikaciju navedena je u literaturi [36]. U aplikaciji se, najprije, pod „poznati parametri“ (eng. *Known parameters*) u padajućem izborniku odabere „frekvencija, akceleracija“ (eng. *Frequency, Acceleration*). Frekvencija se odnosi na brzinu rotacije, koja u konkretnom slučaju iznosi 50 Hz, a akceleracija se odnosi na maksimalnu (eng. *peak*) izmjerenu frekvenciju. Ove frekvencije očitavamo za svaku pojedinu os iz dijagrama na slikama 27, 28, 29 i 30. Iz dijagrama na navedenim slikama vidljivo je da najveća akceleracija u aksijalnom smjeru (os X) iznosi 0.22g, u radijalnom (os Y) 0.95g,

u vertikalnom (os Z) 0.84g, dok najveća rezultantna akceleracija iznosi 0.7g. Upisivanjem navedenih vrijednosti u internetsku aplikaciju, redom se dobivaju brzine: 6.87 mm/s, 29.65 mm/s, 26.22 mm/s i 21.85 mm/s. Slika 33 prikazuje primjer upisanih podataka i dobivene brzine vibracija za maksimalnu rezultantnu vrijednost akceleracije. Formula za izračun brzine preko frekvencije i akceleracije dana je u (1).

$$V = \frac{gA}{2\pi F} \quad (1)$$

INPUT PARAMETERS		
Unit system selection	<input checked="" type="radio"/> Metric (SI) (Hz, mm, mm/s, g)	<input type="radio"/> U.S. units (Hz, in, in/s, g)
Known parameters	Frequency, Acceleration ▾	
Frequency	50	Hz
Acceleration (peak)	0.7	g
Calculate		

Note: Use dot "." as decimal separator.

RESULTS		
Parameter	Value	Unit
Frequency	50	[Hz]
Displacement (peak-to-peak)	0.13911	[mm]
Velocity (peak)	21.85088	[mm/s]
Acceleration (peak)	0.7	[g]

Slika 33. Brzina vibracija dobivena za maksimalnu rezultantnu vrijednost akceleracije [36]

Na temelju ordinate dijagrama na slici 32 i činjenice da se radi o malom stroju koji spada u grupu K, vidljivo je da se sve vrijednosti brzina vibracije nalaze u nedopuštenom području. Prema tome, temeljem preporuke ovog standarda te iznosa vibracijske brzine, trebalo bi se odlučiti o gašenju stroja.

5. ZAKLJUČAK

Nakon provedenih mjerenja i analize prikupljenih podataka, može se zaključiti da sustav za mjerenje vibracija temeljen na računalu Raspberry Pi 2 i digitalnom akcelerometru, ukupne cijene manje od 50 dolara, ostvaruje željenu funkcionalnost. Sustav uspješno prikuplja i pohranjuje podatke o vibracijama, uz zadovoljavajuću točnost i pouzdanost. Uz to, sustav se brzo i jednostavno može modificirati i prilagoditi za obavljanje neke druge funkcije, kao što je upravljanje sa samom objektom održavanja, primjerice gašenjem sustava ako se nalazi u nedozvoljenom području vibracijskih brzina, automatskim generiranjem radnih naloga kao priprema za poduzimanje aktivnosti održavanja itd. Treba naglasiti da je osnovna funkcija sustava prikupljanje i slanje podataka, dok se njihova obrada vrši na moćnijem računalu. Upravo ovakav način rada je temeljna značajka koncepta Interneta objekata. Umjesto skupih, nepovezanih i nefleksibilnih računala i sustava za mjerenje, koristi se velik broj jeftinih, povezanih i fleksibilnih sustava, malih dimenzija i energetske potrebe. Ovime se u potpunosti omogućuje provedba održavanja po stanju, tj. provedba aktivnosti održavanja samo kada je to potrebno, bez obzira na veličinu, raspršenost ili kompleksnost sustava koji se nadzire. Također, primjenom navedenih konceptata, povećava se učinkovitost aktivnosti održavanja, smanjuju se troškovi i vrijeme zastoja te se povećava dostupnost opreme. Glavni nedostatak uvođenja Interneta objekata u održavanje su veliki početni troškovi ugradnje uređaja za mjerenje te troškovi pohranjivanja i obrade velikih količina prikupljenih podataka. Uz to, pojavljuju se i troškovi vezani uz obučavanje zaposlenika za rad s novim tehnologijama te zapošljavanje stručnjaka iz područja analitike velike količine podataka. Ipak, ako se uzme u obzir da cijene i kompleksnost strojeva rastu, a tehnologije nužne za Internet objekata i obradu podataka postaju sve naprednije i pristupačnije, navedeni koncepti će se, u budućnosti, zasigurno primjenjivati još učestalije i u širem opsegu nego danas.

Internet objekata i Big Data, općenito, predstavljaju tehnologije koje su trenutno u fazi eksponencijalnog rasta i proći će još neko vrijeme prije njegovog usporavanja. Ove tehnologije omogućuju razvoj novih poslovnih modela i stvaranje novih tržišta, globalno vrijednih stotine milijarda dolara. Najveći udio u tim tržištima će činiti pružanje usluga, no i proizvođači poluvodiča ove tehnologije vide kao priliku za rast. Sa sve većim brojem korisnika Interneta i povezanih uređaja, uz stalni napredak tehnologije i pad cijene komponenata, Internet objekata zasigurno predstavlja jednu od najbrže rastućih i najprofitabilnijih industrijskih grana budućnosti.

LITERATURA

- [1] Bauer, H.; Patel, M.; Veira, J.: http://www.mckinsey.com/insights/high_tech_telecoms_internet/the_internet_of_things_sizing_up_the_opportunity, McKinsey&Company, 2014. (datum pristupa 18.4.2015.)
- [2] Van der Meulen, R.: <http://www.gartner.com/newsroom/id/2621015>, Gartner, Barcelona, Spain, 2013. (datum pristupa 18.4.2015.)
- [3] http://www.cisco.com/web/solutions/trends/iot/introduction_to_IoT_november.pdf, Lopez Research LLC, San Francisco, CA, USA, 2013. (datum pristupa 19.4.2015.)
- [4] McLellan, C.: <http://www.zdnet.com/article/the-internet-of-things-and-big-data-unlocking-the-power/>, www.zdnet.com, 2015. (datum pristupa 19.4.2015.)
- [5] Kavis, M.: <http://www.forbes.com/sites/mikekavis/2015/02/25/forget-big-data-small-data-is-driving-the-internet-of-things/>, www.forbes.com, 2015. (datum pristupa 19.4.2015.)
- [6] Kavis, M.: <http://www.forbes.com/sites/mikekavis/2014/06/26/the-internet-of-things-will-radically-change-your-big-data-strategy/>, www.forbes.com, 2014. (datum pristupa 19.4.2015.)
- [7] Greenough, J.: <http://www.businessinsider.com/manufacturers-in-the-iot-2014-12>, www.businessinsider.com, 2014. (datum pristupa 20.4.2015.)
- [8] http://www.cisco.com/web/solutions/trends/iot/iot_in_manufacturing_january.pdf, Lopez Research LLC, San Francisco, CA, USA, 2014. (datum pristupa 20.4.2015.)
- [9] Stephenson, D.: <http://radar.oreilly.com/2014/04/the-internet-of-things-enabling-the-era-of-precision-manufacturing.html>, radar.oreilly.com, 2014. (datum pristupa 20.4.2015.)
- [10] <http://www.maintenanceassistant.com/corrective-maintenance/>, www.maintenanceassistant.com, 2015. (datum pristupa 10.5.2015.)
- [11] <http://www.maintenanceassistant.com/preventative-maintenance/>, www.maintenanceassistant.com, 2015. (datum pristupa 10.5.2015.)
- [12] http://en.wikipedia.org/wiki/Condition-based_maintenance (datum pristupa 10.5.2015.)
- [13] <http://www.maintenanceassistant.com/condition-based-maintenance/>, www.maintenanceassistant.com, 2015. (datum pristupa 10.5.2015.)
- [14] Deshpande, B.: <http://www.simafore.com/blog/bid/119414/Connecting-dots-preventive-maintenance-big-data-internet-of-things>, www.simafore.com, 2013. (datum pristupa 11.5.2015.)

- [15] O'Brien, J.: <http://www.reliableplant.com/Read/29962/internet-improve-maintenance>, www.reliableplant.com (datum pristupa 11.5.2015.)
- [16] Zubik, S.: <http://www.swri.org/3pubs/brochure/d09/CBM/Condition-Based-Maintenance.pdf>, Southwest Research Institute, Midwest City, OK, USA (datum pristupa 11.5.2015.)
- [17] <http://www.reliableplant.com/Read/24117/introduction-machinery-vibration>, www.reliableplant.com, Fluke Corporation (datum pristupa 12.5.2015.)
- [18] Lisjak, D.: Predavanja iz Održavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014.
- [19] http://www.me.ua.edu/me360/PDF/Wilcoxon_Research_Vibration_Notes.pdf, Wilcoxon Research, Germantown, Maryland, USA (datum pristupa 25.5.2015.)
- [20] http://www.wilcoxon.com/knowdesk/TN17_Installation%20of%20Vibration%20Sensor%20s.pdf, Wilcoxon Research, Germantown, Maryland, USA (datum pristupa 25.5.2015.)
- [21] http://reliabilityweb.com/index.php/articles/how_is_vibration_measured/, Commtest Instruments, 2006. (datum pristupa 26.5.2015.)
- [22] Lisjak, D.: Vježbe iz Održavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014.
- [23] Aslam, M.: <http://www.iotenableddevices.com/raspberry-pi-arduniogreat-contributors-iot/>, www.iotenableddevices.com, 2014. (datum pristupa 28.5.2015.)
- [24] http://en.wikipedia.org/wiki/Raspberry_Pi (datum pristupa 28.5.2015.)
- [25] Raspberry Pi Foundation: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-2-model-b/> (datum pristupa 28.5.2015.)
- [26] http://en.wikipedia.org/wiki/ARM_Cortex-A7 (datum pristupa 28.5.2015.)
- [27] Richardson, M.; Wallace, S.: Getting Started with Raspberry Pi, Second Edition, Maker Media Inc., Sebastopol, CA, USA, 2015.
- [28] Raspberry Pi Foundation: <https://www.raspberrypi.org/help/quick-start-guide/> (datum pristupa 29.5.2015.)
- [29] Raspberry Pi Foundation: <https://www.raspberrypi.org/help/noobs-setup/> (datum pristupa 29.5.2015.)
- [30] Raspberry Pi Foundation: <https://www.raspberrypi.org/documentation/configuration/raspi-config.md> (datum pristupa 29.5.2015.)
- [31] <http://www.seeedstudio.com/wiki/images/b/b1/MPU6050.pdf>, InvenSense Inc. Sunnyvale, CA, USA, 2011. (datum pristupa 10.6.2015.)

- [32] https://www.olimex.com/Products/Modules/Sensors/MOD-MPU6050/resources/RM-MPU-60xxA_rev_4.pdf, InvenSense Inc. Sunnyvale, CA, USA, 2011. (datum pristupa 10.6.2015.)
- [33] Brown,P.:http://www.lifetime-reliability.com/free-articles/maintenance-management/Fundamentals_of_Vibration_Measurement_and_Analysis_Explained.pdf (datum pristupa 18.6.2015.)
- [34] Protić, T.: Završni rad, Zagreb, 2013.
- [35] Lisjak, D.: Mjerenje vibracija tehničkih sustava, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2011.
- [36] <http://www.amesweb.info/SinusMotion/SinusMotion.aspx> (datum pristupa 7.7.2015.)