



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ

ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА

НОВИ САД

Департман за енергетику, електронику и телекомуникације

Одсек за микрорачунарску електронику

ДИПЛОМСКИ – МАСТЕР РАД

Кандидат: Синиша Лунић

Број индекса: 11249

Тема рада: Једно рјешење програмске подршке за аутоматско
испитивање програмабилних компоненти даљинског
управљача

Ментор рада: др Никола Теслић



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ • ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА
21000 НОВИ САД, Трг Доситеја Обрадовића 6

КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Редни број, РБР :	
Идентификациони број, ИБР :	
Тип документације, ТД :	Монографска документација
Тип записа, ТЗ :	Текстуални штампани материјал
Врста рада, ВР :	Дипломски – мастер рад
Аутор, АУ :	Синиша Лунић
Ментор, МН :	Др Никола Теслић
Наслов рада, НР :	Једно рјешење програмске подршке за аутоматско испитивање програмабилних компоненти даљинског управљача
Језик публикације, ЈП :	Српски / латиница
Језик извода, ЈИ :	Српски
Земља публиковања, ЗП :	Република Србија
Уже географско подручје, УГП :	Војводина
Година, ГО :	2011.
Издавач, ИЗ :	Ауторски репринт
Место и адреса, МА :	Нови Сад; трг Доситеја Обрадовића 6
Физички опис рада, ФО : (поглавља/страна/ цитата/табела/слика/графика/прилога)	9/59/13/2/45/0/0
Научна област, НО :	Електротехника и рачунарство
Научна дисциплина, НД :	Рачунарска техника
Предметна одредница/Кључне речи, ПО :	Bed-of-nails, Аутоматско испитивање, Капацитивни сензори додира, Qmatrix, QTouch
УДК	
Чува се, ЧУ :	У библиотеци Факултета техничких наука, Нови Сад
Важна напомена, ВН :	
Извод, ИЗ :	У овом раду приказано је једно рјешење система за аутоматско испитивање штампаних плоча, у овом случају штампаних плоча даљинских управљача, и програмске подршке за испитивање капацитивних сензора додира даљинског управљача. Размотрене су могуће методе испитивања штампаних плоча, детаљно описана испитна јединица са нагласком на појединости потребне за пројектовање система и програмске подршке, испројектован је систем за испитивање почевши од концепције до готовог рјешења, дато рјешење програмске подршке и укратко илустрован ток испитивања.
Датум прихватања теме, ДП :	22.11.2011.
Датум одбране, ДО :	04.02.2011.
Чланови комисије, КО :	Председник: Др Небојша Пјевалица
	Члан: Др Михајло Катона
	Члан, ментор: Др Никола Теслић
	Потпис ментора



UNIVERSITY OF NOVI SAD • FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES
21000 NOVI SAD, Trg Dositeja Obradovića 6

KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number, ANO :	
Identification number, INO :	
Document type, DT :	Monographic publication
Type of record, TR :	Textual printed material
Contents code, CC :	Master Thesis
Author, AU :	Siniša Lunić
Mentor, MN :	Nikola Teslić, PhD
Title, TI :	Solution of the driver for automatic testing of programmable components of remote controller
Language of text, LT :	Serbian
Language of abstract, LA :	Serbian
Country of publication, CP :	Republic of Serbia
Locality of publication, LP :	Vojvodina
Publication year, PY :	2011.
Publisher, PB :	Author's reprint
Publication place, PP :	Novi Sad, Dositeja Obradovica sq. 6
Physical description, PD : (chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)	9/59/13/2/45/0/0
Scientific field, SF :	Electrical Engineering
Scientific discipline, SD :	Computer Engineering, Engineering of Computer Based Systems
Subject/Key words, S/KW :	Bed-of-nails, Automatic testing, Capacitive touch sensors, Qmatrix, QTouch
UC	
Holding data, HD :	The Library of Faculty of Technical Sciences, Novi Sad, Serbia
Note, N :	
Abstract, AB :	This paper presents an implemenatation of system for automatic testing of remote controller's printed circuit boards and implementation of capacitive touch sensors test driver. Different printed circuit boards testing methods are considered, detailed description of unit under test is given, as well as a solution of the test system, starting from concept to the final solution. Also, the realization of the test driver is given and complete test procedure is described.
Accepted by the Scientific Board on, ASB :	
Defended on, DE :	04.02.2011.
Defended Board, DB :	
President:	Neboša Pjevalica, PhD
Member:	Mihajlo Katona, PhD
Member, Mentor:	Nikola Teslić, PhD
	Menthor's sign

SADRŽAJ

1. Uvod.....	1
2. Automatsko ispitivanje kao dio procesa proizvodnje	3
2.1 Vrste automatskog ispitivanja.....	3
2.2 Specifičnost izabranog načina ispitivanja.....	7
3. Ispitna jedinica.....	8
3.1 Atmel Qmatrix tehnologija	10
3.1.1 Akvizicija kod QMatrix senzora.....	11
3.2 AT42QT2160 integrisano kolo	12
3.2.1 Sekvenca skeniranja matrice.....	12
3.2.2 Skraćivanje serije impulsa	13
3.2.3 Način rada probnog kondenzatora Cs	13
3.2.4 Zasićenje probnog kondenzatora	14
3.2.5 Probni otpornik Rs	15
3.2.6 Vrijednosti dobijene u procesu akvizicije	15
3.2.7 Podešavanje klizača	16
3.2.8 AKS tehnologija.....	16
3.2.9 Inicijalizacija i kalibracija	17
3.2.10 Akvizicija u širokom spektru.....	17
3.2.11 Integrator otkrivanja dodira	17
3.2.12 Mirni režimi rada	17
3.2.13 Kompenzacija drifta	18
3.3 Texas Instruments CC2530 mikrokontroler.....	19
3.4 Zigbee standard	21

3.4.1	IEEE 802.15.4 standard.....	22
3.4.2	Osnovni pojmovi.....	23
3.4.3	Zigbee protokol stek.....	24
3.4.4	Inter-PAN komunikacija	26
3.5	Koraci u automatskom ispitivanju.....	26
3.5.1	Ispitivanje napajanja.....	27
3.5.2	Ispitivanje stabilisanog napona linearnog regulatora	27
3.5.3	Unos koda u programsku memoriju mikrokontrolera.....	27
3.5.4	Ispitivanje RF komunikacije.....	27
3.5.5	Analiziranje dobijene poruke.....	27
3.6	Zahtjevi za sistem za ispitivanje	27
4.	Koncepcija rješenja sistema za ispitivanje	28
4.1	Uređaj za povezivanje ispitne jedinice sa mjerno-akvizicionom i opremom za programiranje	28
4.2	Mreža prekidača	29
4.3	Razmatranje mogućnosti za ispitivanje kapacitivnih senzora dodira.....	31
4.3.1	Ispitivanje senzora simulacijom dodira.....	31
4.3.1.1	Simulacija dodira pomoću ploče sa elektrodama	31
4.3.1.2	Simulacija dodira pomoću uređaja sa pneumatskim prstima	33
4.3.2	Ispitivanje senzora bez simulacije dodira.....	34
4.4	Uređaji korišćeni u ispitivanju	34
4.4.1	Mjerno-akviziciona oprema.....	34
4.4.2	Uređaji za napajanje	34
4.4.3	Programator	35
4.4.4	RF primopredajnik	35
4.5	Personalni računar sa aplikacijom za upravljanje izvođenjem ispitivanja	35
5.	Opis sistema za ispitivanje	36
5.1	Presa sa igličastim konektorima.....	38
5.2	Računarom upravljiva ploča releja.....	39
5.3	Računarom upravljiv naponski izvor.....	40
5.4	Računarom upravljiv osciloskop.....	40
5.5	Programator.....	41
5.6	RF Primopredajnik	43
6.	Realizacija programske podrške	45
6.1	Analiza vrijednosti očitanih sa senzora	47

7. Proces ispitivanja	50
7.1 Rezultati ispitivanja	55
8. Zaključak	56
9. Literatura	58

SPISAK SLIKA

Slika 2.1 Automatska optička inspekcija PCB-a:.....	4
Slika 2.2 Fotografija integrisanog kola sa BGA konektorom napravljena X zracima	4
Slika 2.3 Primjer ispitivanja zalemljenih nožica integrisanog kola Flying probe metodom .	5
Slika 2.4 Izgled PCB-a po ostvarenom kontaktu sa igličastim konektorima	6
Slika 3.1 Blok-šema daljinskog upravljača	8
Slika 3.2 Izgled daljinskog upravljača	9
Slika 3.3 Izgled PCB-a daljinskog upravljača sa markiranim ispitnim tačkama	9
Slika 3.4 Raspodjela električnog polja u okolini QMatrix senzora	10
Slika 3.5 Akvizicija kod Qmatrix senzora	11
Slika 3.6 Napon na probnom kondenzatoru	11
Slika 3.7 Povezivanje matrice tastera sa AT42QT2160	13
Slika 3.8 Napon na kondenzatoru Cs u zasićenju	14
Slika 3.9 Ispravan napon na kondenzatoru Cs	15
Slika 3.10 Kompenzacija drifta	19
Slika 3.11 Unutrašnja struktura mikrokontrolera CC2530/CC2531	20
Slika 3.12 Zigbee stek i IEEE 802.15.4 standard	22
Slika 3.13 Detaljan prikaz Zigbee protokol steka	24
Slika 3.14 Zigbee stek sa StubAPS nivoom	26
Slika 4.1 Konceptijska šema sistema za ispitivanje	28
Slika 4.2 Izgled igličastih konektora	29
Slika 4.3 Konceptijska šema prekidačke mreže	30
Slika 4.4 PCB daljinskog upravljača i PCB sa elektrodama	32
Slika 4.5 Rezultati mjerenja	33

Slika 5.1 Blok šema sistema za ispitivanje	37
Slika 5.2 Checksum TR-5-400-QC presa	38
Slika 5.3 Računatom upravljiva ploča releja	39
Slika 5.4 Agilent E3631A	40
Slika 5.5 Agilent 54622d	41
Slika 5.6 SmartRF05 Razvojna ploča	42
Slika 5.7 Arhitektura razvojne ploče SmartRF05.....	42
Slika 5.8 P3 ExtSoc Debug konektor.....	43
Slika 5.9 Pretvarač nivoa signala konektora ispitne jedinice	43
Slika 5.10 CC2531 USB primopredajnik.....	44
Slika 5.11 Izgled kompletnog sistema za ispitivanje.....	44
Slika 6.1 Glavni algoritam programske podrške	46
Slika 6.2 Ispravni opsezi vrijednosti očitanih sa senzora	47
Slika 6.3 Podalgoritam analiza podataka	49
Slika 7.1 Postavljanje panela na presu sa igličastim konektorima	50
Slika 7.2 Spuštanje poluge prese	51
Slika 7.3 Početak ispitivanja – unos bar koda	51
Slika 7.4 Tok ispitivanja	52
Slika 7.5 Izgled tekstualne datoteke sa “sirovim” podacima ispitivanja	53
Slika 7.6 Vizuelni prikaz rezultata ispitivanja.....	53
Slika 7.7 Rezultati ispitivanja prikazani u alatu Microsoft Office Excel 2003.....	54
Slika 7.8 Zbirni izvještaj	54

SPISAK TABELA

Tabela 3.1 Numeracija tastera	12
Tabela 3.2 Poređenje bežičnih tehnologija	22

SKRAĆENICE

PCB	- <i>Printed Circuit Board</i>
RF	- <i>Radio Frequency</i> , Radio frekvencija
PCB	- <i>Printed Circuit Board</i> , Štampana elektronska ploča
AOI	- <i>Automated Optical Inspection</i> , Automatizovana optička inspekcija
AXI	- <i>Automated X ray inspection</i> , Automatizovana inspekcija X zracima
BGA	- <i>Ball-Grid Array</i> , Integrisano kolo sa mrežom konektora na donjoj strani
AKS	- <i>Adjacent Key Suppresion</i> , Tehnologija blokiranja tastera iz iste grupe
I²C	- <i>Inter-Integrated Circuit</i> , Komunikacioni protokol za povezivanja integrisanih kola
IEEE	- <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> , Institut elektro i elektronskih inženjera
SPI	- <i>Serial Peripheral Interface</i> , Serijska periferijska međusprega
GPIB	- <i>General Purpose Interface Bus</i> , Spojna magistrala opšte namjene
SCPI	- <i>Standard Commands for Programmable Instrumentation</i> , Standardne komande za programibilnu instrumentaciju
GPIO	- <i>General Purpose Input/Output</i> , Ulazno/Izlazni pinovi opšte namjene
GPO	- <i>General Purpose Output</i> , Izlazni pinovi opšte namjene
PAN	- <i>Personal Area Network</i>
LCD	- <i>Liquid Cristal Display</i>

1. Uvod

Ispitivanje elektronskih uređaja neizostavni je dio proizvodnog procesa. Izbor metode ispitivanja i ispitne opreme direktno se odražava na konačnu cijenu uređaja. Jedna od mogućnosti za obavljanje proizvodnog ispitivanja je i upotreba sistema koji sadrži presu sa igličastim konektorima (eng. bed-of-nails).

Zadatak ovog rada je da se realizuje sistem za automatsko ispitivanje PCB-ova (engl. Printed Circuit Board) daljinskog upravljača. Sistem je baziran na presi sa igličastim konektorima, i mora da omogući ispitivanje mogućnosti programiranja mikrokontrolera daljinskog upravljača, napona na lokalnom stabilizatoru, kapacitivnih senzora dodira i RF komunikacije. Potrebno je razmotriti mogućnosti za ispitivanje kapacitivnih senzora dodira i realizovati programsku podršku za njihovo ispitivanje kao dio programske podrške daljinskog upravljača u vidu zasebnog programskog modula. Rezultati ispitivanja trebaju da se čuvaju u zasebnim datotekama i potrebno je obezbijediti jednostavan i brz način za pregledanje i analizu rezultata.

Rad je podijeljen u devet poglavlja :

- Drugo poglavlje sadrži pregled najpopularnijih metoda za ispitivanje PCB-ova i izbor metode koja će se koristiti
- U trećem poglavlju detaljno je opisana ispitna jedinica. Kao uvod u programsku podršku za ispitivanje kapacitivnih senzora dodira opisana je Atmel Qtouch tehnologija, AT42QT2160 senzorsko integrisano kolo, Texas Instruments CC2530 mikrokontroler i ukratko Zigbee standard bežične komunikacije. Na kraju je definisani skup koraka dovoljan da se potvrdi funkcionalnost uređaja.

- Četvrto poglavlje sadrži razmatranje o vrstama potrebnih uređaja u sastavu sistema i načinu njihovog korišćenja. Detaljno su razmotrene mogućnosti za ispitivanje kapacitivnih senzora dodira kao stavke bitne za realizaciju programske podrške koja je obrađena u šestom poglavlju.
- U petom poglavlju je opisan isprojektovani sistem za ispitivanje. Dat je pregled svih korišćenih uređaja, njihove osnovne osobine i uloga u ispitivanju.
- Šesto poglavlje sadrži opis realizacije programske podrške za ispitivanje kapacitivnih senzora dodira ugrađenih u daljinski upravljač.
- U sedmom poglavlju je prikazan tok samog procesa ispitivanja iz perspektive operatera i način čuvanja rezultata ispitivanja.
- Osmo poglavlje je zaključak.

2. Automatsko ispitivanje kao dio procesa proizvodnje

Automatsko ispitivanje PCB-ova predstavlja nezaobilazni dio procesa proizvodnje. Otkrivanje grešaka nastalih u proizvodnji ne smije oduzeti previše vremena i sredstava jer se time smanjuje produktivnost i konkurentnost. U današnje vrijeme kada se životni ciklus jednog elektronskog uređaja mjeri mjesecima, trajanje ispitivanja ne smije značajno produžiti vrijeme izlaska uređaja na tržište[1].

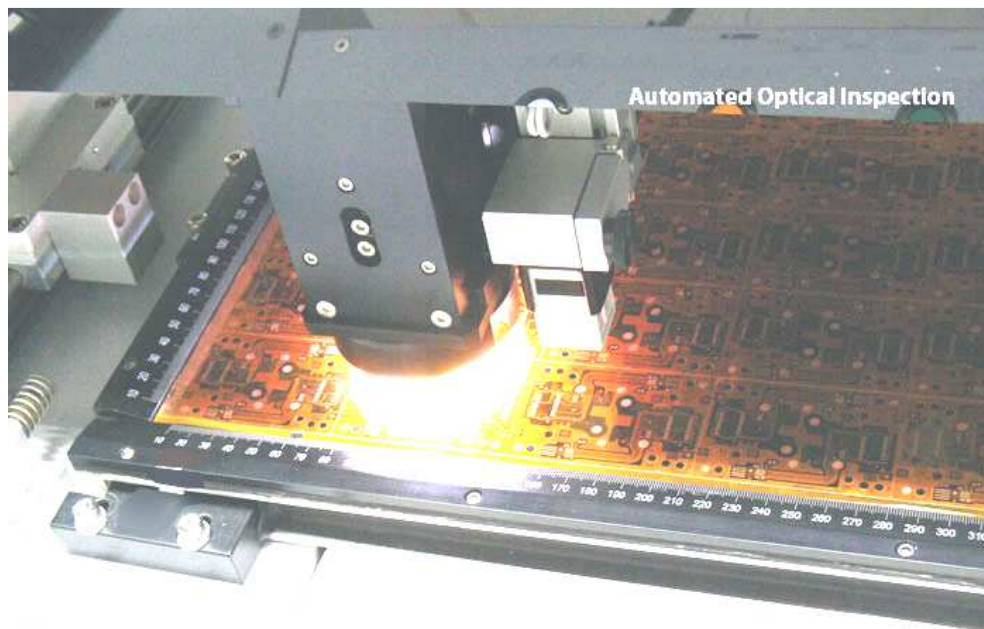
Automatizacija ispitivanja predstavlja upotrebu softvera za kontrolu izvođenja koraka ispitivanja, poređenje dobijenih rezultata sa predviđenim, postavljanje preduslova ispitivanja i druge funkcije kontrole ispitivanja i izvještavanja o ispitivanju. Obično automatizacija ispitivanja predstavlja automatizaciju manualnih koraka koji se već upotrebljavaju za ispitivanje.

2.1 Vrste automatskog ispitivanja

Kod proizvodnje PCB glavne vrste automatskog ispitivanja su ispitivanje u kolu (In-circuit testing), optičko ispitivanje (AOI - automated optical inspection), ispitivanje X zracima (AXI - Automated x-ray inspection), ispitivanje sa ivice (Boundary scan) i funkcionalno ispitivanje (Functional testing).

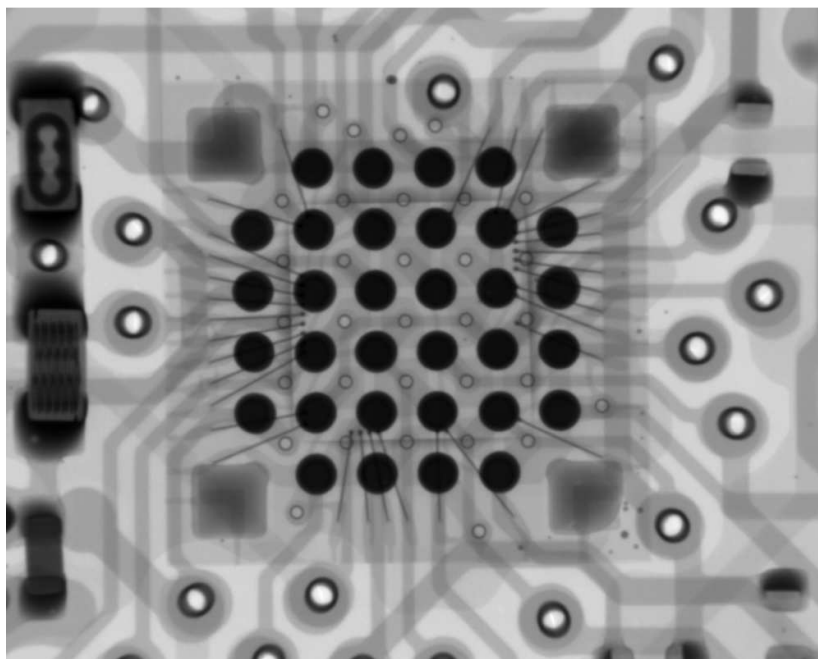
Automatska optička inspekcija se obavlja tako što kamera pravi fotografije proizvedene ploče a zatim je upoređuje sa fotografijom referentne ploče. Na ovaj način se mogu detektovati ogrebotine, nedostajuće, pogrešne ili pogrešno okrenute komponente, višak ili nedostatak lema. Ispitivanje pomoću X zraka se zasniva na sličnom principu, samo što se umjesto vidljive svjetlosti koriste X zraci. Ova vrsta inspekcije pored pomenutih mogućnosti otkriva i nedostatke štampane ploče nedostupne običnoj kameri. Naročito je zanimljiva upotreba ove vrste ispitivanja

kod ploča koje sadrže BGA (Ball-Grid Array) integrisana kola, jer su njihovi priključci ispod čipa i nisu vidljivi golim okom.



Slika 2.1 Automatska optička inspekcija PCB-a:

Na **Slici 2.1** je prikazana aparatura za AOI sa automatizovanom kamerom koja prelazi preko PCB-a tražeći defekte.

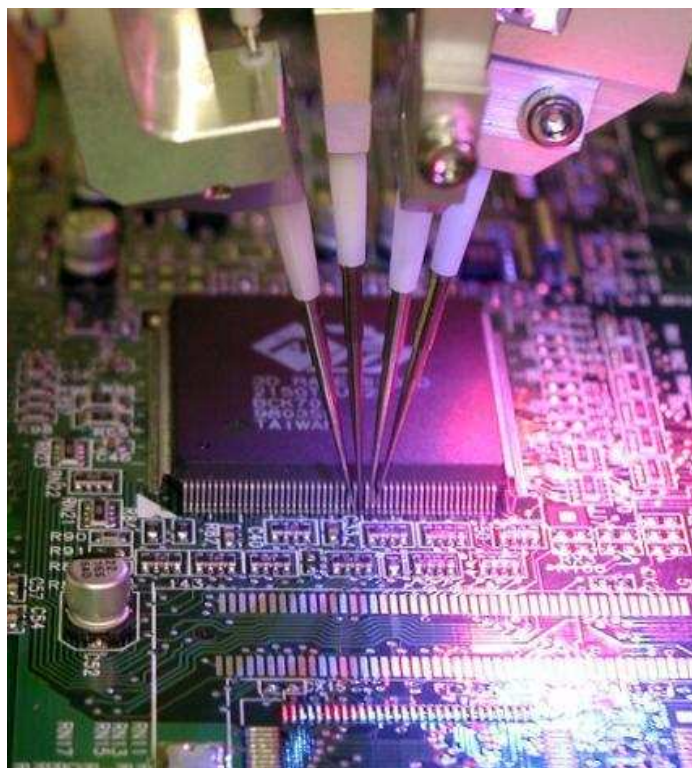


Slika 2.2 Fotografija integrisanog kola sa BGA konektorom napravljena X zracima

Na **Slici 2.2** je prikazana slika integrisanog kola sa BGA konektorima koji se nalaze ispod njega i nisu dostupni običnoj optičkoj inspekciji. Konektori ove vrste postaju vidljivi samo inspekcijom X zracima.

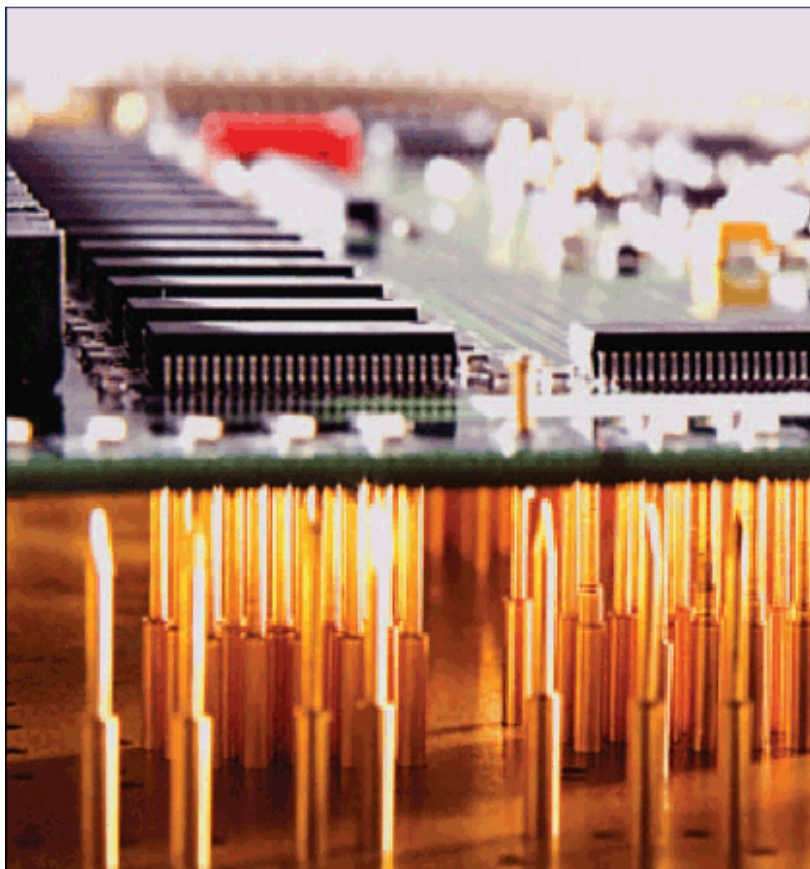
Ispitivanje sa ivice (Boundary scan) je predmet standarda IEEE 1149.1 **Standard Test Access Port and Boundary-Scan Architecture**, poznato je i pod nazivom **Joint Test Action Group (JTAG)**. Ovaj standard se danas masovno koristi za portove za ispitivanje integrisanih kola. Pomoću ovog načina ispitivanja moguće je spolja pristupiti određenim dijelovima ili čitavoj štampanoj ploči i predstavlja osnovni način ispitivanja ugniježđenih računarskih sistema.

Ispitivanje u kolu (In-circuit testing) je ispitivanje na principu bijele kutije gdje se uz pomoć električnih sonda ispituju PCB-ovi naseljeni komponentama. Ovim ispitivanjem se provjeravaju otvoreni i kratki spojevi, otpornost, kapacitivnost i slične osnovne veličine koje ukazuju na to da li je uređaj pravilno izrađen. Ispitivanje u kolu može biti izvršeno uz pomoć fiksature sa igličastim konektorima (Bed-of-nails fixture) ili uz pomoć postavke sistema bez prese, npr. pomoću leteće sonde (Flying probe).



Slika 2.3 Primjer ispitivanja zalemljenih nožica integrisanog kola Flying probe metodom

Na slici 2.3 je prikazan primjer primjene Flying probe uređaja proizvođača Takaya, gdje se četiri sonde brzo kreću po ploči, ostvaruju kontakt sa određenim komponentama i obavljaju In-circuit ispitivanje.



Slika 2.4 Izgled PCB-a po ostvarenom kontaktu sa igličastim konektorima

Češće korišćena metoda In-circuit ispitivanja je ispitivanje upotrebom Bed-of-nails fiksature. U ovoj metodi PCB se dovodi u kontakt sa igličastim konektorima (Slika 2.4) koristeći Bed-of-nails fiksaturu. Fiksatura ima dva zadatka:

- a) Da omogući precizno pozicioniranje PCB-a tako da igličasti konektori pogode predviđene tačke za ispitivanje (engl. test points)
- b) Da omogući pritisak dovoljan da se sabiju opruge igličastih konektora i time obezbijedi kvalitetna galvanska veza između konektora i tačaka za ispitivanje.

Sistem za ispitivanje pomoću leteće sonde dosta je jeftiniji od sistema sa igličastim konektorima. Pored toga, vrijeme potrebno za prilagođavanje ovakvog sistema ispitivanju

konkretnog PCB-a znatno je kraće od vremena potrebnog za projektovanje sistema za ispitivanje pomoću fiksature sa igličastim konektorima. Zbog toga je, imajući u vidu vremenska ograničenja pri razvoju, sistem leteće sonde pogodniji za ispitivanje prototipa uređaja. Mana mu je što zahtijeva dosta vremena za ispitivanje svake pojedinačne ispitne jedinice, tako da je nepraktičan za ispitivanje pri masovnoj proizvodnji.

Funkcionalno ispitivanje je ispitivanje na principu crne kutije koje se obavlja pred isporuku uređaja. Ono obično predstavlja niz koraka ispitivanja koji se izvršavaju na gotovom proizvodu i provjeravaju njegovu funkcionalnost. Svaki od koraka rezultuje sa prošao (engl. passed) ili pao (engl. failed) rezultatom. U principu, nema stepena uspješnosti ili neuspješnosti koraka. To komplikuje pronalazak konkretne greške na jedinicama koje su pale na ispitivanju, tako da je ova metoda manje praktična za ispitivanje koja karakteriše veliki procenat neispravnih jedinica[2][3].

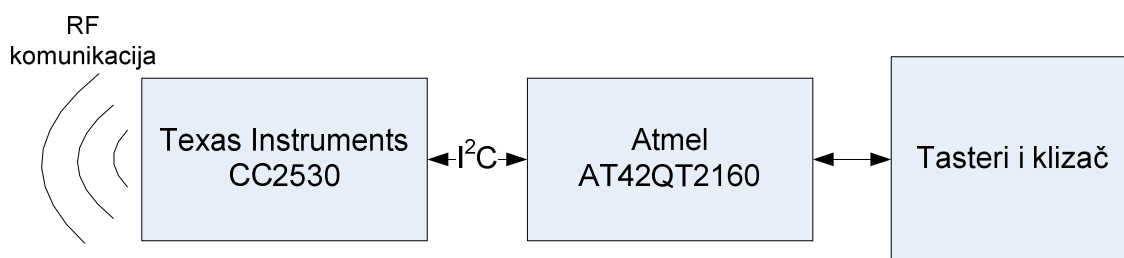
2.2 Specifičnost izabranog načina ispitivanja

Od strane projekatata uređaja koji se ispituje odlučeno je da ispitna jedinica bude ispitivana kombinacijom dvije poslednje metode. Za pristupanje električnim kontaktima se koristi fiksatura sa igličastim konektorima, jer omogućava da se odjednom na nju postavi više uređaja koji će potom jedan za drugim biti ispitani. Pored ove prednosti igličasti konektori na fiksaturi mogu podnijeti daleko više spajanja i razdvajanja (oko 1.000.000) sa ispitnom jedinicom nego bilo koji drugi standardni konektor. Preko 6 tačaka za ispitivanje se vrše funkcionalno ispitivanje ali i mjerenje napona na jednoj od tih tačaka što izlazi iz okvira ispitivanja po principu crne kutije i ulazi u domen ispitivanja po principu bijele kutije.

Ocijenjeno je da će ovakav hibridni pristup omogućiti ispitivanje u optimalnom broju koraka i sa dovoljnim brojem korisnih podataka iz kojih je kasnije moguće obezbijediti uputstva za popravku uređaja koji ne prođu ispitivanje.

3. Ispitna jedinica

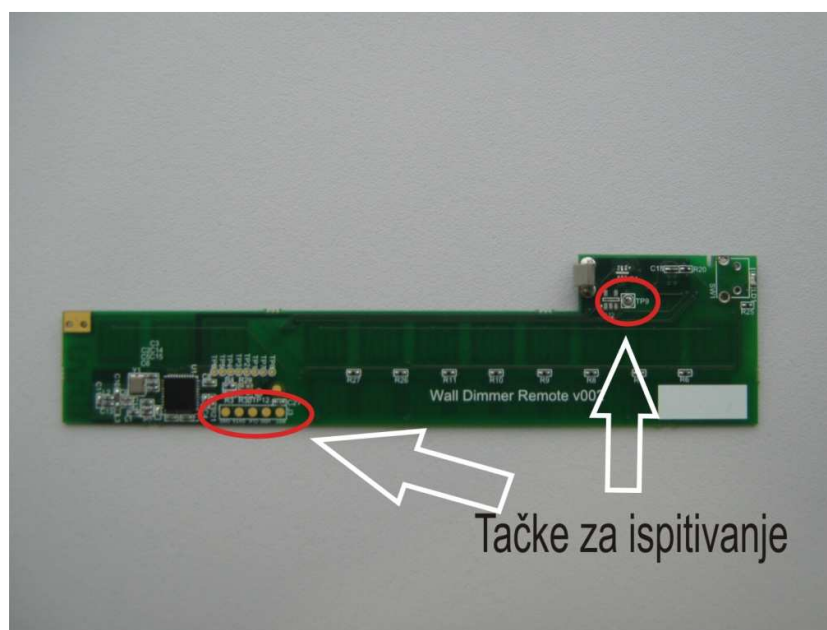
Uređaj koji se podrgava ispitivanju je daljinski upravljač sa RF primopredajnikom. Njegova blok-šema data je na **Slici 3.1**. Na **Slici 3.2** prikazan je izgled daljinskog upravljača, a na **Slici 3.3** PCB daljinskog upravljača sa markiranim tačkama predviđenim za kontakt sa opremom za ispitivanje. Daljinski upravljač je zasnovan na Texas Instruments CC2530 mikrokontroleru. Na daljinskom upravljaču se nalazi jedanaest tastera i klizač koji su zasnovani na Atmel-ovoj Qmatrix tehnologiji kapacitivnih senzora dodira. Za akviziciju sa senzora koristi se Atmel AT42QT2160 senzorsko integrisano kolo koje može da se spregne sa najviše šesnaest tastera i jednim klizačem. Komunikacija između mikrokontrolera i senzorskog integrisanog kola odvija se putem I²C (Inter-Integrated Circuit) magistrale.



Slika 3.1 Blok-šema daljinskog upravljača



Slika 3.2 Izgled daljinskog upravljača



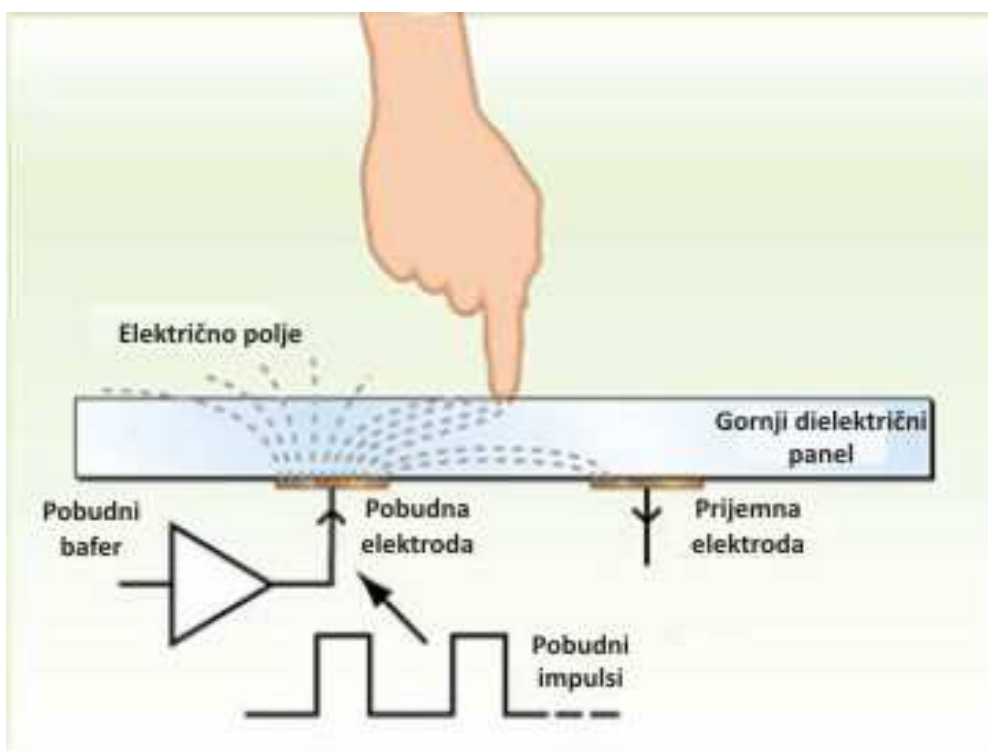
Slika 3.3 Izgled PCB-a daljinskog upravljača sa markiranim ispitnim tačkama

U ovom poglavlju su predstavljeni Atmel Qmatrix tehnologije, osnovni principi funkcionisanja Atmel AT42QT2160 senzorskog integrisanog kola, neophodni za realizaciju programske podrške. Zatim je pomenut Texas Instruments CC2530 mikrokontroler i ukratko predstavljen Zigbee standard. Poglavlje je završeno opisom koraka pri automatskom ispitivanju i zahtjeva sistema za ispitivanje.

3.1 Atmel Qmatrix tehnologija

QMatrix tehnologija zasnovana je na senzorskim integrisanim kolima koja otkrivaju dodir skeniranjem pasivne matrice elektroda. Elektrode su obično bakarne površine na štampanoj ploči, ali mogu biti i površine od čistog provodnog indium-kalaj oksida. Jedan QMatrix uređaj može da bude spregnut sa veliki brojem tastera, što rezultuje jako malom cijenom pojedinačnog tastera.

QMatrix tehnologija zamjenjuje mehaničke prekidače na svim vrstama kontrolnih ploča, od kućanskih aparata do mobilnih telefona. Ploče mogu da imaju debljinu i do 50 mm. Oblik i položaj tastera mogu da budu proizvoljno izabrani u skladu sa estetskim i funkcionalnim potrebama. Na **Slici 3.4** je predstavljena raspodjela električnog polja i sprega senzorske površine sa pobudnom logikom.



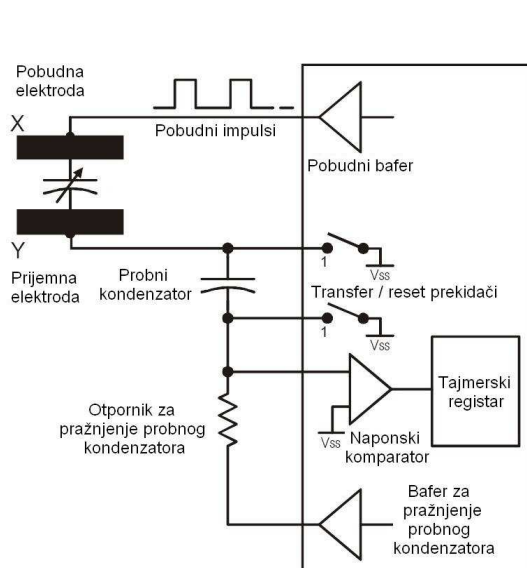
Slika 3.4 Raspodjela električnog polja u okolini QMatrix senzora

QMatrix tehnologija koristi po par senzorskih elektroda za svaki kanal. Prva je pobudna elektroda na koju se dovodi signal u „burst“ modu, a druga prima signal posredstvom ploče od dielektričnog materijala koja je preko njih postavljena. Prinošenjem prsta se narušava električno polje koje postoji između elektroda i to se registruje kao dodir. QMatrix integrisano kolo sadrži pobudnu, prijemnu i logiku za obradu, tako da zahtijeva mali broj dodatnih komponenti.

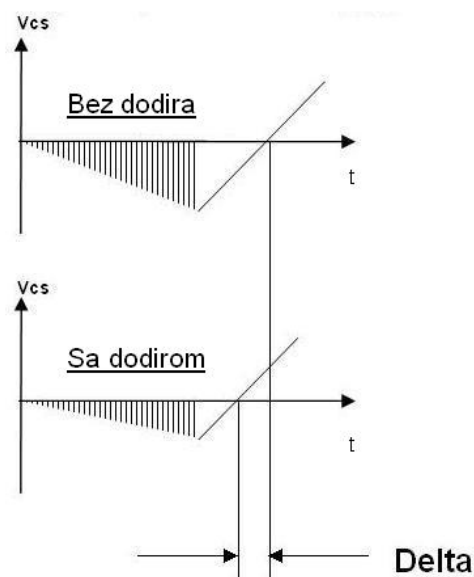
Komunikacija se odvija putem SPI (Serial Peripheral Interface) ili I²C (Inter-Integrated Circuit) sprege, a dijagnostika dizajna je moguća sa bilo kog personalnog računara preko USB sprege [4].

3.1.1 Akvizicija kod QMatrix senzora

Na **Slici 3.5** prikazano je Qmatrix akviziciono kolo. Na pobudnu elektrodu se dovodi niz impulsa. Prijemna elektroda sakuplja većinu naelektrisanja koja se posredstvom električnog polja prenose sa pobudne elektrode kroz dielektričnu ploču. Električna sprega između elektroda smanjuje se dodiranjem, pošto ljudsko tijelo odvlači dio polja koje se prostire kroz dielektričnu ploču.



Slika 3.5 Akvizicija kod Qmatrix senzora



Slika 3.6 Napon na probnom kondenzatoru

Impulsi koji prolaze kroz kondenzator koga čine X i Y elektrode pune probni kondenzator, a generisanje impulsa je sinhronizovano sa radom prekidača. Pošto broj impulsa određuje pojačanje kola, promjenom broja impulsa pojačanje kola može da se podesi tako da odgovara različitim veličinama tastera, materijala od kojih je napravljena dielektrična ploča i različitim debljinama ploča. Na **Slici 3.6** prikazan je uticaj dodira na punjenje probnog kondenzatora.

Po završetku punjenja serijom impulsa, probni kondenzator se prazni preko otpornika za pražnjenje i mjeri se vrijeme dok komparator ne registruje prolazak napona na kondenzatoru kroz nulu. Izmjereno vrijeme zavisi od sprežnog polja između elektroda, a ono direktno zavisi od dodira prstom koji apsorbira dio tog polja [5].

3.2 AT42QT2160 integrisano kolo

AT42QT2160 je senzorsko integrisano kolo koje funkcioniše na principu prenosa naelektrisanja u “burst” modu. Isprojektovan je namjenski za upravljanje kapacitivnim senzorima dodira raspoređenim u vidu matrice. Posjeduje svu funkcionalnost neophodnu za pouzdano praćenje odziva senzora u širokom spektru različitih radnih uslova. Pored kontrolera, za rad je potrebno svega nekoliko dodatnih diskretnih komponenti. Cijelo kolo se može napraviti na nekoliko kvadratnih centimetara jednostrane štampane ploče. Kao dielektrik se može koristiti jeftini CEM-1 ili FR1 materijal, koji se na štampanu ploču može pričvrstiti pomoću ljepljive trake, npr. pomoću 3M VHB dvostrane trake.

AT42QT2160 koristi senzorsku tehnologiju zasnovanu na transferu naelektrisanja koja otkriva promjene pri prenosu naelektrisanja emitovanih u vidu impulsa sa jedne na drugu elektrodu. AT42QT2160 nudi veliku slobodu u izboru oblika i veličine tastera postavljenih na dodirnu površinu.

Podaci o stanju tastera i podešavanje parametara svakog tastera se prenose putem I²C sprege. Komande su osmišljene tako da se minimalnom količinom prenetih podataka prenese maksimalna količina informacija. Pored otkrivanja dodira, što je standardan način rada, moguće je dobiti i informaciju o jačini signala.

3.2.1 Sekvenca skeniranja matrice

Tasteri su postavljeni u vidu električne mreže koja se sastoji od 8 X i 2 Y linija. Akvizicija funkcioniše tako što se redom skenira svaki pojedinačni taster. Skeniranje počinje na lokaciji X0, Y0. X kanali se nazivaju i redovi, a Y kolone, iako to nema veze sa fizičkim rasporedom tastera na štampanoj ploči. Tasteri se skeniraju red po red: X0Y0, X1Y0...X7Y0, X0Y1, X1Y1 itd., a svaki taster je označen brojem od 0 do 15 kao u **Tabeli 3.1**.

	X7	X6	X5	X4	X3	X2	X1	X0	
Y0	7	6	5	4	3	2	1	0	Brojevi tastera
Y1	15	14	13	12	11	10	9	8	

Tabela 3.1 Numeracija tastera

Na X elektrodu svakog tastera se emituje serija pobudnih impulsa čija je dužina određena parametrom Burst length, a može se podešavati za svaki taster posebno. Da bi mogla započeti akvizicija sa sljedećeg tastera, emitovanje pobudnih impulsa na prethodni taster mora biti završeno. Probni kondenzator na kome je postignu određeni napon emitovanjem pobudnih impulsa sada se prazni serijom akvizicionih impulsa. Dužina serije akvizicionih impulsa

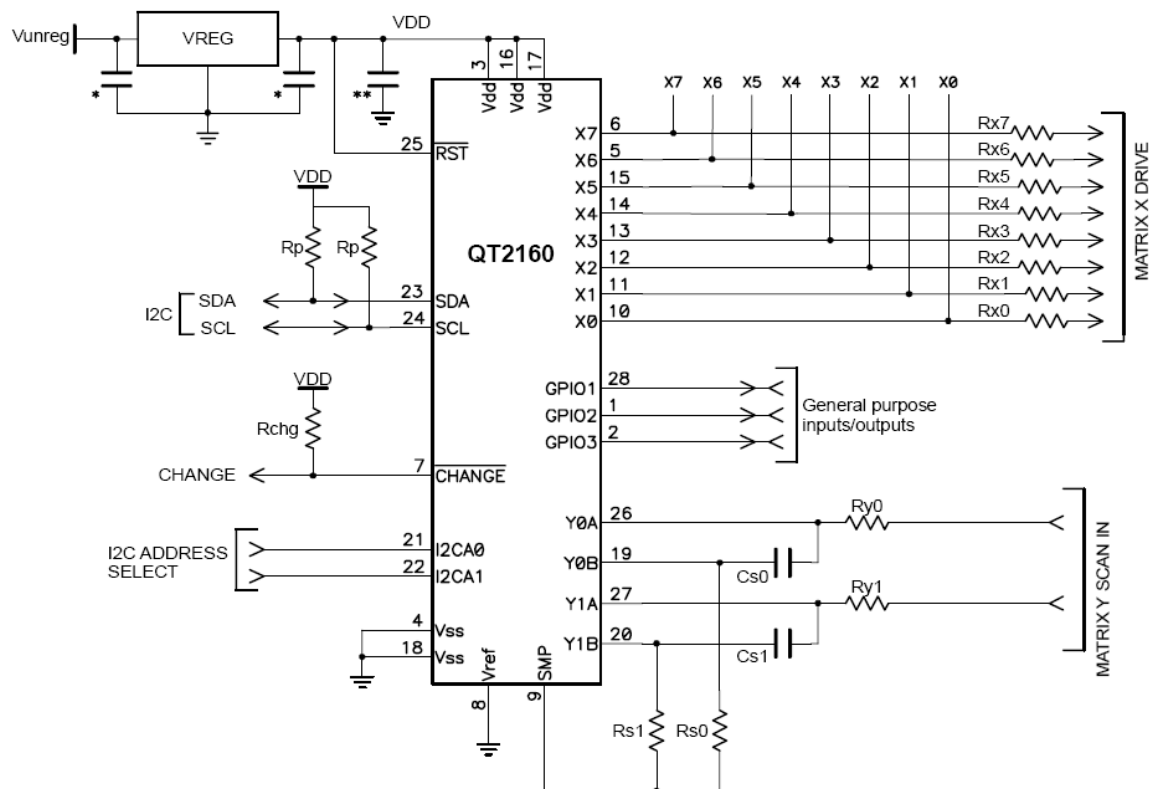
potrebnih da se kondenzator isprazni određuje osjetljivost tastera, što znači da se osjetljivost svakog tastera može nezavisno podešavati.

3.2.2 Skraćivanje serije impulsa

Tasteri koji su isključeni podešavanjem dužine serije pobudnih impulsa na nulu ne učestvuju u sekvenci skeniranja radi uštede vremena, a samim tim i smanjenja potrošnje. AT42QT2160 radi sa ciklusom nepromjenljive dužine trajanja od 16 ms. Pošto se završi proces akvizicije i obrade, ide u mirni način rada gdje ostaje do početka sljedećeg ciklusa. Kao posljedica ovakvog načina rada, korišćenje manjeg broja tastera rezultuje manjom potrošnjom.

3.2.3 Način rada probnog kondenzatora Cs

Cs kondenzatori absorbiraju energiju sa pri rastućoj ivicu pobudnog signala na X senzorskoj elektrodi. Na opadajuću ivicu pobudnog signala, Y kanal se spaja sa nulti potencijal radi neutralizovanja naelektrisanja na provodnicima i elektrodama radi pripreme za naredni pobudni impuls. Naelektrisanje na Cs kondenzatoru stepeničasto raste pri svakom pobudnom impulsu. Principijelni način povezivanja matrice tastera, kondenzatora Cs i ostalih diskretnih komponenata na AT42QT2160 prikazan je na **Slici 3.7**.



Slika 3.7 Povezivanje matrice tastera sa AT42QT2160

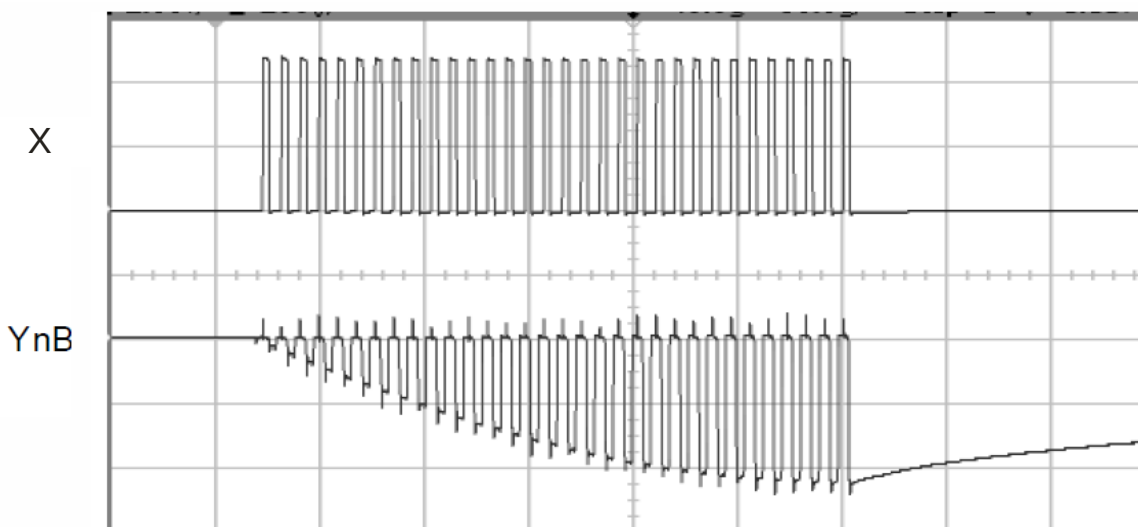
Po završetku serije pobudnih impulsa, mikrokontroler spaja Y liniju na nulti potencijal, tako da je na drugom kraju probnog kondenzatora negativan napon. Zatim se naelektrisanje na Cs kondenzatoru mjeri tako što se, preko spoljašnjeg otpornika, negativan napon spušta sve dok ne dostigne nulu, što se otkriva pomoću detektora nule.

Preporučena vrijednost ovog kondenzatora za većinu slučajeva je oko 4.7 nF, a tip X7R sa tolerancijom od 10%. Ako je kapacitivna sprega između X i Y elektrode dovoljno velika, kondenzator Cs je može napuniti do prije kraja serije pobudnih impulsa. U tom slučaju treba smanjit broj pobudnih impulsa u seriji ili povećati Cs kondenzator, ili uraditi i jedno i drugo.

Ukoliko se jedna Y linija ne koristi, odgovarajući Cs kondenzator može biti izostavljen, a nožica mikrokontrolara ostavljena da visi.

3.2.4 Zasićenje probnog kondenzatora

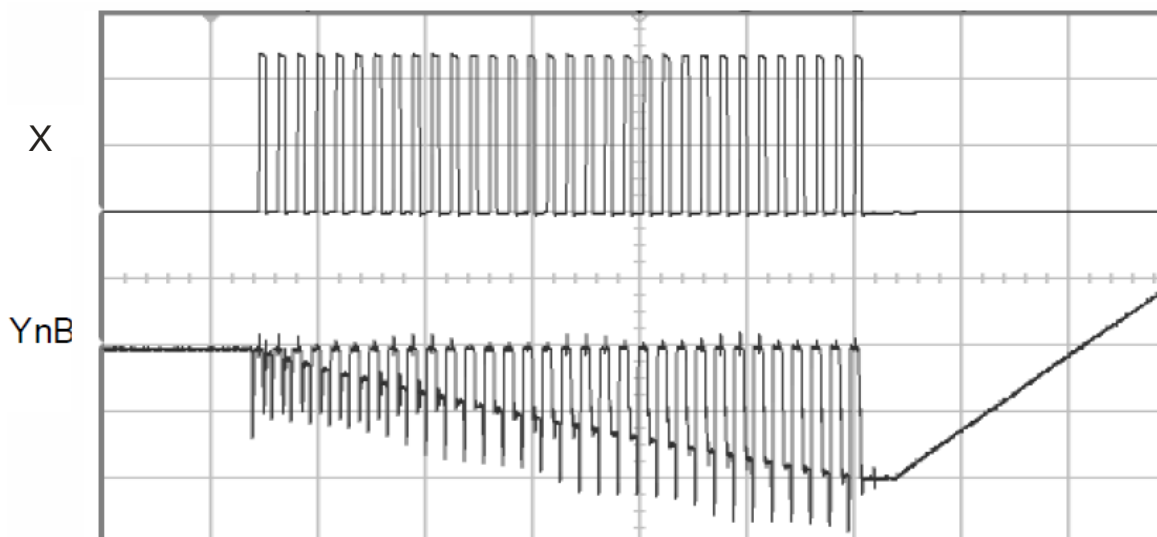
Na Slici **Slici 3.8** je prikazan napon na kondenzatoru Cs kada dođe do zasićenja. Zasićenje nastupa kada napon na pinu YnB padne ispod -0.25V u toku serije pobudnih impulsa. To se dešava kada, usljed porasta napona na kondenzatoru, provedu zaštitne diode na pinu mikrokontrolera. To sprječava dalji porast napona na probnom kondenzatoru i negativno utiče na tačnost mjerenja. Uzrok zasićenja je previliki broj pobudnih impulsa, premala vrijednost kondenzatora Cs, ili prejaka kapacitivna sprega između X i Y senzorske elektrode.



Slika 3.8 Napon na kondenzatoru Cs u zasićenju

Moguća rješenja su slabljenje kapacitivne sprege između X i Y korekcijom senzorske strukture na štampanoj ploči, dodatno povećanje rastojanja između X i Y provodnih linija, povećanje kapacitivnosti Cs ili smanjenje dužine serije pobudnih impulsa. Povećanjem kapacitivnosti Cs usporava porast napona na njemu, a smanjenje dužine serije pobudnih impulsa

utiče na pad osjetljivosti. Ispravan napon na kondenzatoru Cs, kada ne dolazi do zasićenja, prikazan je na **Slici 3.9**.



Slika 3.9 Ispravan napon na kondenzatoru Cs

3.2.5 Probni otpornik Rs

Probni otpornici Rs0 i Rs1 se koriste pri konverziji sa jednostrukim nagibom napona na probnom kondenzatoru Cs. Brzina porasta napona na kondenzatoru je proporcionalna vrijednosti otpornika. U većini slučajeva se koristi otpornik od $1\text{M}\Omega$. Ukoliko se jedna od Y linija ne koristi, odgovarajući otpornik ne mora biti prisutan u kolu.

3.2.6 Vrijednosti dobijene u procesu akvizicije

Očitane vrijednosti u normalnom slučaju trebaju da budu u opsegu od 200 do 750 impulsa, ukoliko su tasteri na štampanoj ploči pravilno oblikovani i vrijednost otpornika Rs dobro izabrana. Dugačke i paralelno postavljene X i Y linije na štampanoj povećavaju kapacitivnost, što može da rezultuje pogrešnim očitavanjem, kao i zasićenjem napona na probnom kondenzatoru. Senzorska kapacitivnost trebalo bi da potiče što je više moguće od kapacitivne sprege X i Y elektroda, a što manje od sprege X i Y provodnih linija.

Promena vrijednosti signala u slučaju dodira malim prstom bi trebala da bude najmanje 8 impulsa (ciljana vrijednost bi trebala da bude 12 impulsa). Podešena vrijednost praga signala bi trebala da bude manja od vrijednosti promjene signala uzrokovane najslabijim dodirrom.

Povećanjem dužine serije pobudnih impulsa očitava se jači signal, a isto se postiže i sa većom vrijednosti probnog otpornika Rs.

3.2.7 Podešavanje klizača

Grupa tastera može biti konfigurisana tako da čine klizač, pored mogućnosti da se koriste kao obični tasteri. Klizač se nalazi na Y0 liniji matrice tastera i mora početi od linije X0, a ostali tasteri koji čine klizač moraju da budu uzastopno poredani po X liniji. Klizač može da zauzme proizvoljan broj tastera sa Y0 linije. Ostali tasteri na Y liniji mogu da se koriste kao obični tasteri.

Informacija o poziciji može se računati u rezoluciji u opsegu od 2 bita (0-3) do 8 bita (0-255). Geometrijska ograničenja mogu da utiču da informacija o poziciji ne dostiže maksimalnu vrijednost. Tanji dielektrik ili korišćenje više tastera na klizaču povećava maksimalnu vrijednost koja može da se dostigne.

Pouzdanost informacije o poziciji klizača zavisi od jačine signala koju daju tasteri klizača. Ukoliko se informacija o poziciji računa u visokoj rezoluciji, deblji panel može da prouzrokuje nepouzdanost očitavanja.

Najlinearniji odziv klizača se postiže ukoliko je veličina tastera koji ga čine između 5 i 7mm. Klizač treba da se sastoji od onoliko tastera koliko ih je potrebno da bi se postigla potrebna dužina.

Klizač se tretira kao jedan objekat pri AKS (Adjacent Key Suppresion) grupisanju. Tasteri klizača su, po podrazumijevanim postavkama, podešeni da imaju istu dužinu serije pobudnih impulsa i vrijednost praga, mada ih je moguće i drugačije podesiti po cijenu smanjenja linearnosti.

3.2.8 AKS tehnologija

Mogu da postoje najviše tri AKS grupe koje su podešene tako da stanje sa samo jednog tastera iz grupe može da se očitava u jednom trenutku. AKS tehnika se fokusira na dominantan taster, i stanje sa ostalih tastera se neće očitavati dok se ovaj taster ne otpusti. Ovo korisniku omogućava da pređe prstom preko više tastera, pri čemu se očitavanje vrši samo sa dominantnog tastera. Svaki taster može da bude u jednoj od grupa od 1 do 3, ili u grupi nula pri čemu je AKS tehnika akvizicije isključena.

AKS tehnika se ne može primjeniti unutar grupe tastera koji čine klizač. Ovakav način rada je neophodan da bi se moglo registrovati lagano pomicanje. Više taster koji čine klizač mogu biti posmatrani u isto vrijeme, bez obzira kakvo je njihovo AKS podešavanje. S druge strane, AKS tehnika se koristi ukoliko pored klizača postoje i dodatni tasteri. Na primjer, ukoliko je klizač unutar iste AKS grupe kao i tasteri, dodirivanje klizača će da onemogućiti očitavanje sa tastera, i obrnuto.

3.2.9 Inicijalizacija i kalibracija

Po dovođenju napajanja, uređaj započinje proces inicijalizacije koji traje oko 70 ms. Po završetku inicijalizacije započinje kalibracije u toku koje se cijela matrica tastera skenira 15 puta.

Kalibracija se ne obavlja periodično. Tasteri se kalibrišu samo po dovođenju napajanja i kada je, pored toga što su u podešavanjima uključeni, ispunjen neki od sljedećih uslova:

- taster je u stanju detekcije duži vremenski interval, pri čemu je vrijeme nakon koga počinje kalibracija definisano od strane korisnika
- delta vrijednost signala je veća od vrijednosti pozitivnog praga, koja se definiše kao referentna vrijednost plus tri četvrtine vrijednosti negativnog praga
- korisnik je izdao naredbu za ponovnu kalibraciju

3.2.10 Akvizicija u širokom spektru

AT42QT2160 koristi modulaciju pobudnih impulsa u širokom spektru. Na taj način se smanjuje osjetljivost senzorskih površina na negativne efekte elektromagnetne interferencije istovremeno šireći opseg RF emisije. Ova mogućnost je tvrdo ugrađena u uređaj i ne može se isključiti niti može biti modificovana. Rad u širokom spektru frekvencija povećava robusnost uređaja.

3.2.11 Integrator otkrivanja dodira

Uređaj posjeduje poseban mehanizam koji omogućava detekciju dodira na pouzdan i robustan način. Brojač, zaseban za svaki taster, se inkrementira svaki put kad signal sa njega pređe vrijednost praga, i u tom stanju ostane određeni broj akvizicija. Kada brojač dostigne unaprijed definisanu granicu, taster se proglašava pritisnutim.

Na primjer, ukoliko je vrijednost granice 10, signal sa tastera mora da pređe vrijednost praga i ostane iznad nje 10 uzastopnih akvizicija prije nego što se taster proglasi pritisnutim. Ukoliko u toku bilo koje od tih akvizicija vrijednost signala padne ispod vrijednosti praga, brojač se briše i proces započinje ispočetka.

3.2.12 Mirni režimi rada

Dužina radnog ciklusa uređaja je 16ms i ne može se mijenjati. U toku tog vremena se izvrše potrebna mjerenja, a ostatak ciklusa se uređaj uspavljuje, odnosno odlazi u neki od režima sa niskom potrošnjom. Postoje dva režima rada sa niskom potrošnjom: LP (Low Power) i SLEEP režim.

LP režim se koristi da bi se smanjila potrošnja uređaja kada se tasteri ne dodiruju neko vrijeme. Podešavanjem ovog režima određuje se i koliko često će se uređaj vraćati u normalan režim rada radi kompenzacije drifta, kao i maksimalno vrijeme potrebno za reakciju na prvi dodir nakon neaktivnosti.

Kada se registruje dodir, uređaj počinje da radi sa najkraćim ciklusom (16ms) radi što brže reakcije na dodir. Uređaj ostaje u ovom režimu ukoliko se tasteri i dalje dodiruju i otpuštaju.

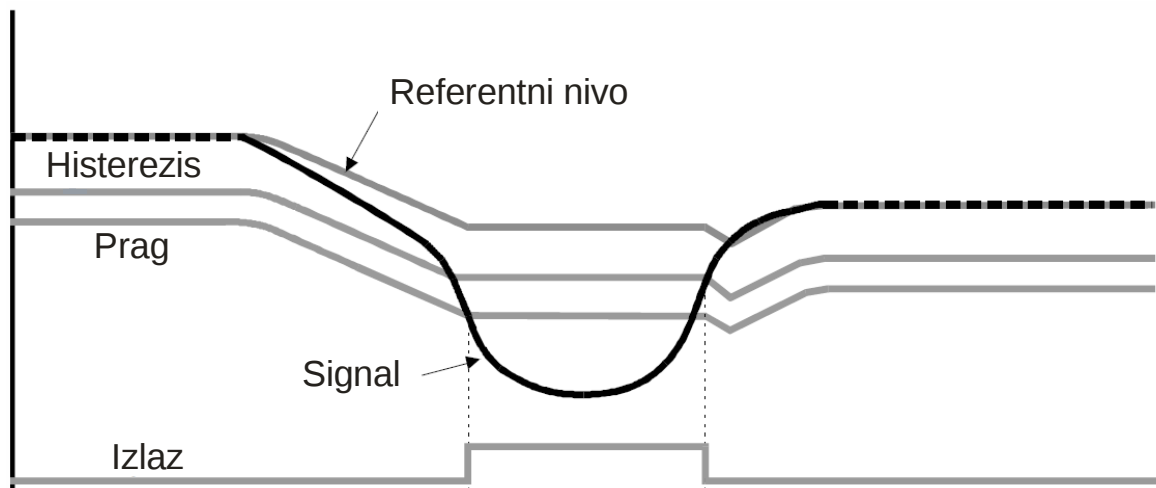
Period mjerenja mora da bude manji od 16 ms da bi uređaj ispravno funkcionisao. Ukoliko period mjerenja prekorači dužinu ciklusa, AT42QT2160 i dalje radi sa radnim ciklusom od 16ms, ali se vremenski parametri perioda kompenzacije drifta i perioda rekalkibracije mijenjaju.

SLEEP režim je režim jako male potrošnje, u toku koga se mjerenja uopšte ne obavljaju. Lokalni brojač je zaustavljen, a struja koju uređaj troši je manja od 2 μ A. U ovom režimu PWM (Pulse Width Modulation) funkcija se neće izvršavati na GPIO/GPO pinovima, tako da ih je potrebno podesiti na potrebno stanje prije ulaska u režim. Uređaj se budi iz ovog režima ukoliko je prozvan preko I²C (Inter-Integrated Circuit) magistrale, hardverski resetovan ili je aktiviran LP režim.

3.2.13 Kompenzacija drifta

Vrijednost očitavanja sa senzora može da varira zbog promjena kapacitivnosti C_x i C_s tokom vremena i pri promjeni temperature. Veoma je bitno da ove promjene (drift) budu na odgovarajući način kompenzovane, u protivnom može doći do pogrešnih detekcija i poremećaja osjetljivosti.

Kompenzacija drifta je postignuta tako što referentni nivo sporim tempom prati vrijednost signala, i to samo onda kada se ne očitava dodir. To praćenje mora da bude postepeno da ne bi došlo do ignorisanja pravih dodira. Vrijednosti praga i histerezisa vezane su za referentni nivo. To je prikazano na **Slici 3.10**.



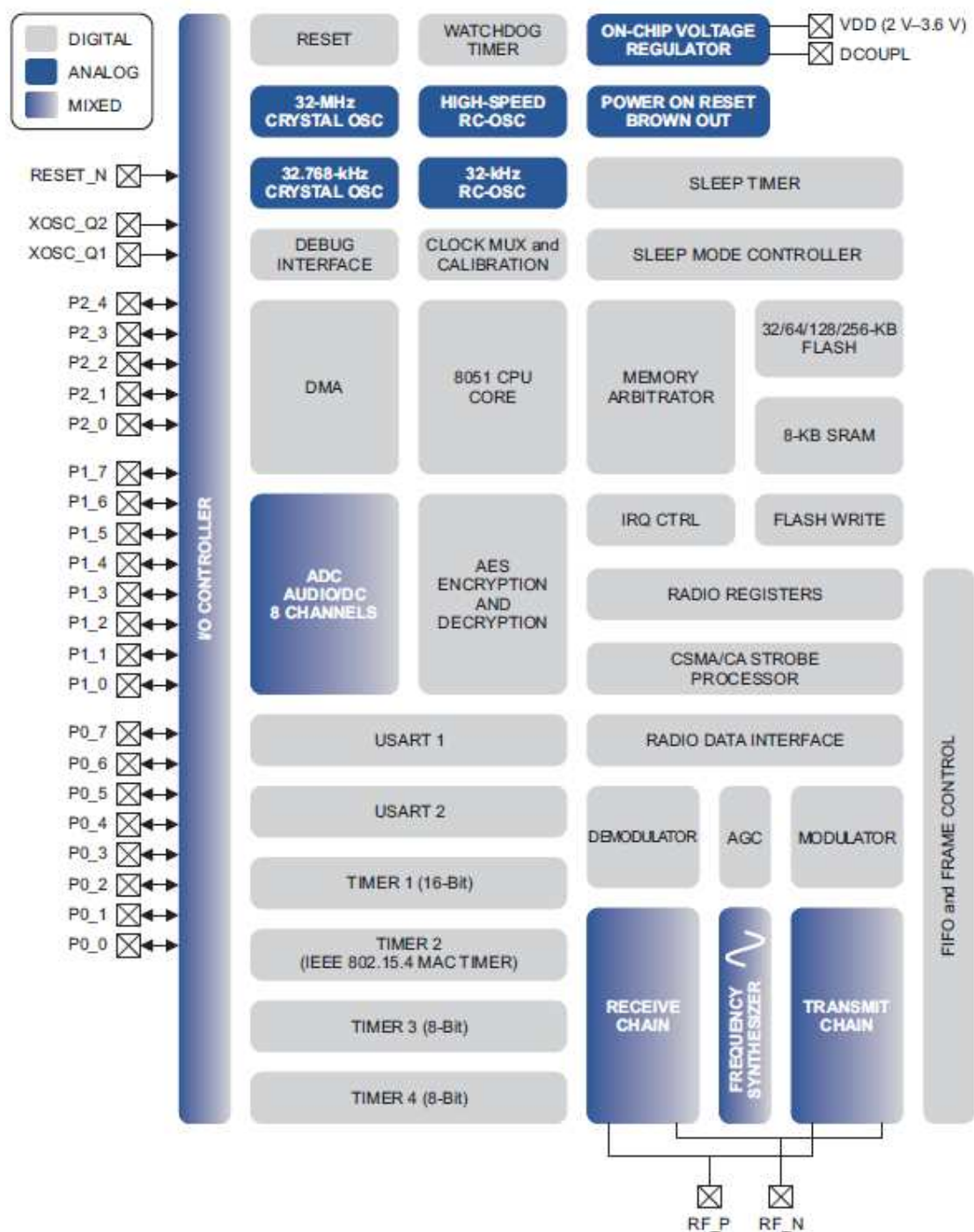
Slika 3.10 Kompenzacija drifta

Kada se senzor pritisne, vrijednost očitano signala opadne, pošto ljudsko tijelo odvlači dio naelektrisanja sa kapacitivnosti koju čine X i Y elektrode. Izolovan objekat koji se ne dodiruje (metalni novčić ili sloj vode), postavljen u blizini ili na samu površinu senzora, prouzrokuje veoma malu promjenu očitano signala zato što unosi malu dodatnu kapacitivnost. Kada se dodir registruje, mehanizam za kompenzaciju drifta prestaje da radi. Kompenzacija drifta je aktivna samo do trenutka kada vrijednost očitavanja pređe vrijednost praga.

Kompenzacija drifta se može podesiti tako da bude asimetrična. Referentni nivo može da prati signal očitano sa senzora brže pri porastu nego pri opadanju. Kompenzacija drifta bi trebala da bude brža za rastuće nego za opadajuće signale. Opadajući signali ne bi trebali da se kompenzuju isuviše brzo, pošto bi to moglo da onemogući očitavanje dodira [6].

3.3 Texas Instruments CC2530 mikrokontroler

Pored osnovnih funkcionalnosti koje posjeduje, mikrokontroler oznake *CC2530F256* ima ugrađen i RF primo-predajnik za bežičnu komunikaciju. Podržani su IEEE 802.15.4, Zigbee i RF4CE protokoli. Unutrašnja struktura mikrokontrolera data je na **Slici 3.11** [7].



Slika 3.11 Unutrašnja struktura mikrokontrolera CC2530/CC2531

Ključne karakteristike CC2530 su sljedeće:

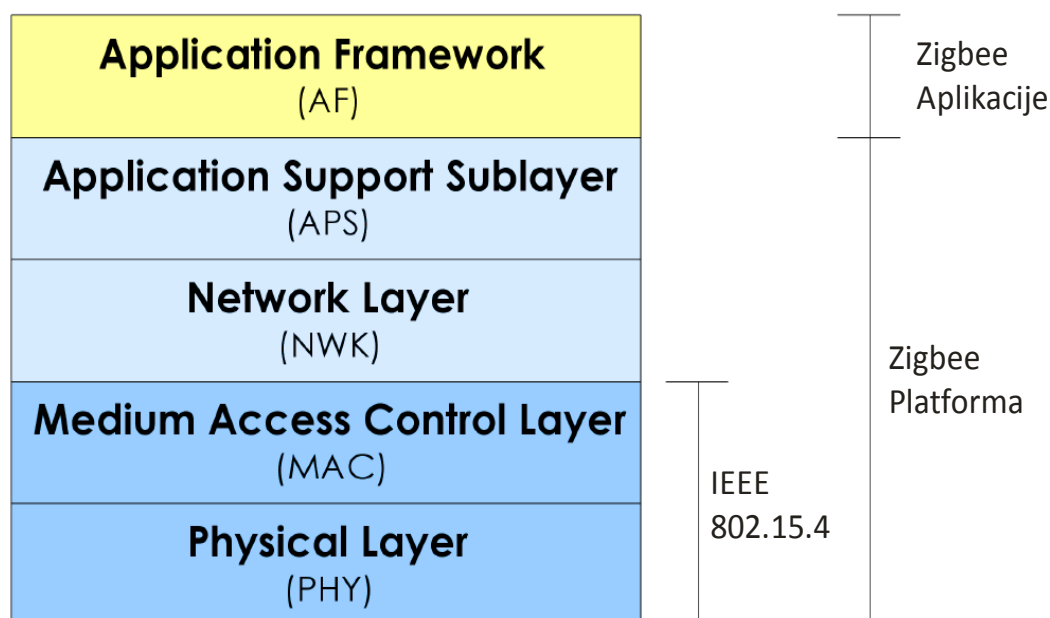
- Ugrađena periferija za bežičnu komunikaciju na 2.4 GHz,
- Poboljšano 8051 jezgro, po idustrijskim standardima,
- Mala potrošnja,
- 256 kB programabilne memorije (flash memory),
- 8 kB SRAM memorije,
- Jedno 16-bitno kolo vremenske kontrole i tri 8-bitna,
- Dva kanala za serijsku komunikaciju,
- Generator impulsno-širinske modulacije (PWM).

3.4 Zigbee standard

Zigbee protokol je realizovan kao nadogradnja IEEE 802.15.4 radio komunikacionog standard, što je prikazano na **Slici 3.12**. Zigbee specifikaciju održava neprofitni industrijski konzorcijum proizvođača poluprovodnika, distributera ove tehnologije i drugih kompanija. Oni su udruženi u Zigbee savez koji čini više od 150 kompanija.

Zigbee specifikacija je projektovana tako da iskoristi mogućnosti koje podržava IEEE 802.15.4 standard. Ciljna grupa Zigbee-ja su primjene koje karakteriše mala brzina prenosa informacija kao i ograničena potrošnja.

Ciljno tržište uređaja zasnovanih na Zigbee protokolu je kontrola kućnih uređaja i automatizacija zgrada. Zigbee protokol se koristi za proizvoljno podešavanje osvjjetljenja i temperature, nadgledanje strukture zgrade i nadzor sa minimalnom interakcijom sa korisnikom.



Slika 3.12 Zigbee stek i IEEE 802.15.4 standard

Poređenje vodećih bežičnih tehnologija dat je u **Tabeli 3.2**. Mogućnost upotrebe Bluetooth standarda u senzorskim mrežama je veoma ograničena, a velika potrošnja energije Wi-Fi uređaja čine ovu tehnologiju nepogodnom za upotrebu. Poredeći sa navedenim tehnologijama, Zigbee je veoma interesantan za primjenu u senzorskim mrežama [8].

	<i>Zigbee</i>	<i>Bluetooth</i>	<i>Wi-Fi</i>
Standard	802.15.4	802.15.1	802.11b
Memorijski zahtjeve	4-32KB	250KB+	1MB+
Životni vijek baterije	Godine	Dani	Sati
Brizina	250Kb/s	1Mb/s	11Mb/s
Domet	300m	10m	100m

Tabela 3.2 Poređenje bežičnih tehnologija

3.4.1 IEEE 802.15.4 standard

Aktuelni IEEE 802.15.4 standard potiče iz 2003-će godine i njime upravlja IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). Ovaj standard se razlikuje od mnogo raširenijeg 802.11 standarda po manjoj brzini protoka informacija i manjoj potrošnji.

U praksi, koriste se brzine u opsegu od 20 do 250 kbps u zavisnosti od toga koja od tri dostupne radio frekvencije se koristi na fizičkom nivou.

Mogućnosti upravljanja potrošnjom ugrađene u ovaj standard omogućavaju baterijski napajanim uređajima da rade mjesecima.

3.4.2 Osnovni pojmovi

Zigbee mreža se zove PAN (Personal Area Network) i sastoji se od jednog koordinatora, jednog ili više krajnjih uređaja (end device), i jednog ili više rutera.

Koordinator je odgovoran za unutrašnju funkcionalnost Zigbee mreže. On sa zadatim PAN identifikatorom podiže mrežu u koju se mogu priključivati ivični uređaji. Ruteri se mogu koristiti kao posrednici do koordinatora unutar mreže, i na taj način omogućavaju da se mreža proširi mimo dometa samog koordinatora. Ruteri se ponašaju kao lokalni koordinatori prema krajnjim uređajima koji se priključuju mreži, i stoga moraju da posjeduju većinu mogućnosti koji imaju i koordinatori.

Zajedničko za koordinatore i rutere je da su napajani iz mreže, i u većini slučajeva im je radio komunikacija stalno aktivna. S druge strane, ivični uređaji mogu biti isprojektovani tako da su aktivni u malim vremenskim intervalima, što je naročito pogodno u slučaju da su baterijski napajani, jer takav režim rada omogućava malu potrošnju.

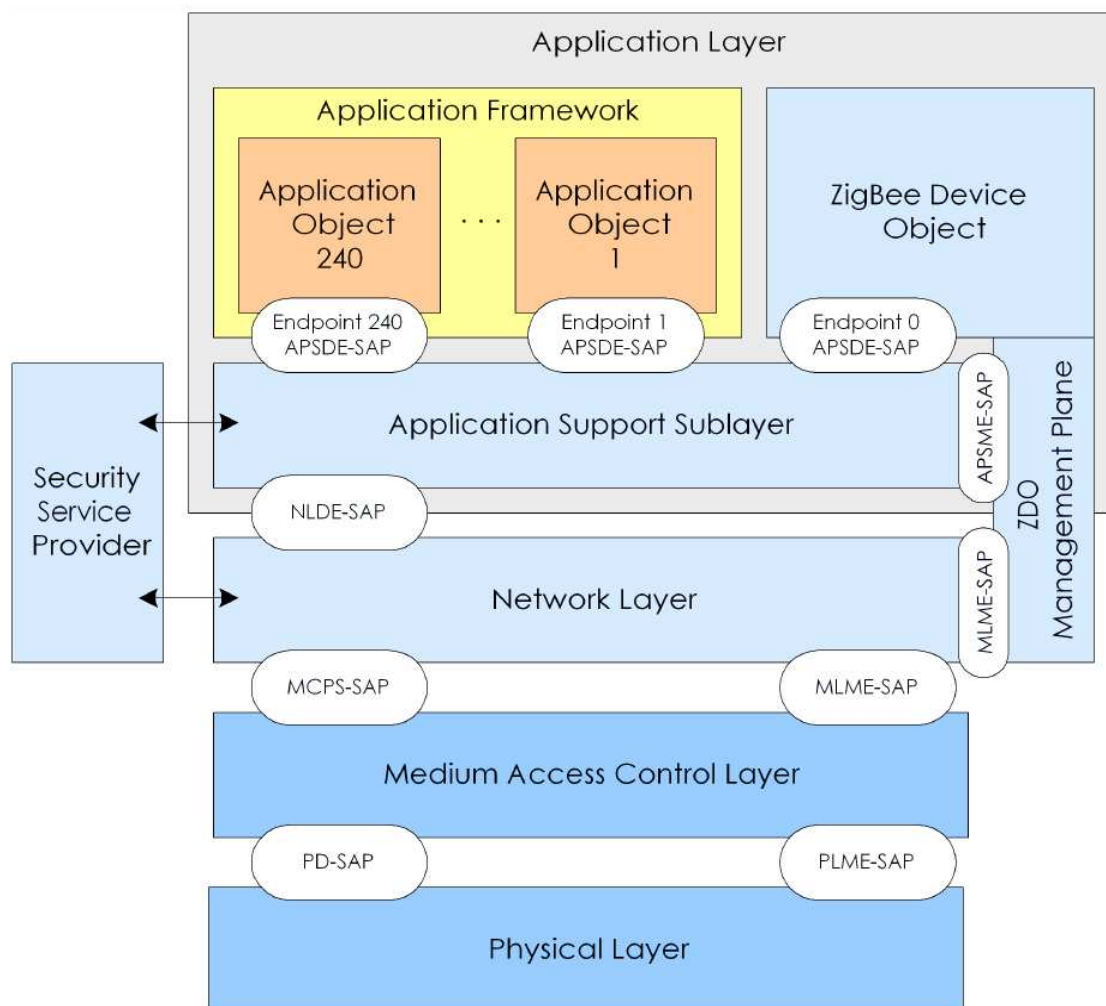
Zigbee savez nudi veliki broj profila koji predstavljaju okvir za različite primjene. Na ovaj način ivični uređaji različitih proizvođača mogu raditi jedni sa drugim, dokle god su pridruženi istim profilima.

Unutar svakog čvora mreže može biti definisano više krajnjih tačaka (end point). Kroz krajnje tačke se definiše više različitih profila za uređaj koji predstavlja čvor mreže. Na primjer, zamislimo blok koji se sastoji od tri prekidača koji imaju zajednički modul za radio komunikaciju. Iako fizički pripadaju istom čvoru, sa stanovišta Zigbee-ja oni su tri različite krajnje tačke. Unutar jednog čvora može biti definisano maksimalno 240 krajnjih tačaka.

Dok krajnje tačke služe za adresiranje, značenje konkretne primjene uređaja se definiše kroz klaster. Klaster se može posmatrati kao objekat koji sadrži komande i podatke, odnosno kod i atribut. Komande izvršavaju određene akcije na klasterima, dok atributi opisuju stanje u kome se klaster nalazi. Zamislimo obično sijalicu sa mogućnosti podešavanja nivoa osvjjetljenja (dimovanja). Za tu primjenu mogli bi biti definisani klasteri Upali/Ugasi i Podešavanje nivoa. Akcije bi bile komande za paljenje i gašenje, za klaster Upali/Ugasi, i komanda za dimovanje za klaster Podešavanje nivoa. Podaci su slučaju prvog klastera predstavljaju jedno polje koje govori da li je svjetlo upaljeno ili ugašeno, a u slučaju drugog klastera to je polje koje daje informaciju o nivou osvjjetljenosti.

Svaka Zigbee mreža po formiranju dobija 16-bitni identifikator, PAN ID (Personal Area Network Identifier), koji služi da bi se logički razdvojili čvorovi koji pripadaju različitim mrežama, a nalaze se blizu jedni drugih i na istom fizičkom kanalu. Pored njega svaka mreža je jednoznačno određena 64-bitnim proširenim identifikatorom, Extended PAN ID (EPID). Ovaj broj se koristi samo ukoliko neki uređaj treba da se pridruži tačno određenoj mreži.

3.4.3 Zigbee protokol stek



Slika 3.13 Detaljan prikaz Zigbee protokol steka

Zigbee protokol stek vuče korijene u OSI (Open System Interconnect) modelu sa sedam nivoa koji je počeo da se koristi još u ranim osamdesetim godinama prošlog vijeka. Zigbee protokol stek je detaljno ilustrovan na **Slici 3.13**. Dva donja nivoa su preuzeta iz IEEE 802.15.4 standarda, dok su dva preostala nivoa definisana od strane Zigbee saveza:

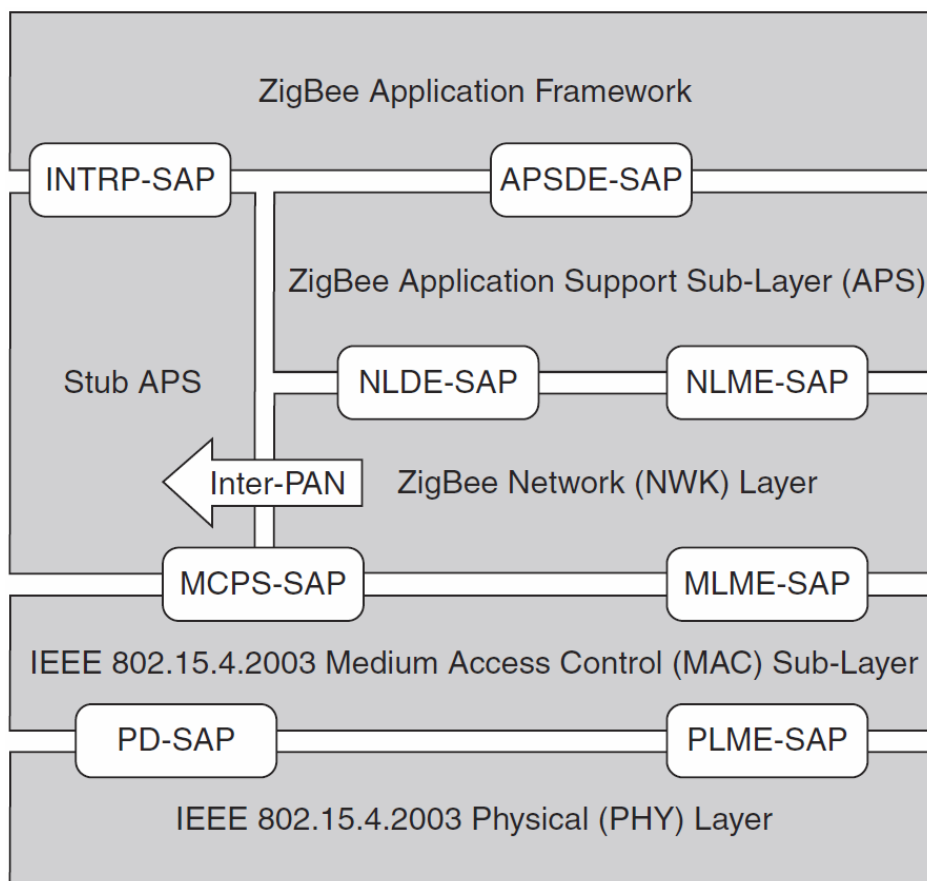
1. **Fizički nivo** je najniži nivo i definisan je u 802.15.4 standardu. Podržava radu u opsezima oko 868Mhz, 915 Mhz i 2.4 Ghz.
2. **Nivo za upravljanje pristupom medijumu** (engl. Medium Access Control – MAC) je odgovoran za pristup prenosnom radio kanalu. Ovaj nivo je, između ostalog, zadužen za sinhronizaciju mreže i pouzdan prenos zahvaljujući CRC-om (Cyclic Redundancy Check) i ponovljenim emitovanjima.
3. **Mrežni nivo** prima poruke sa aplikacionog nivoa i šalje ih na njega, a definisan je od strane Zigbee saveza. Izvršava spajanje na mrežu i uklanjanje sa nje, zadužen je za bezbjednost podizanje mreže i dodjelu adresa. Ovi servisi su obezbjeđeni kroz dvije sprege NLME-SAP (Network Layer Management Entity Service Access Point) i NLDE-SAP (Network Layer Data Entity Service Access Point).
4. **Aplikacioni nivo** je najviši nivo, takođe je definisan od strane Zigbee saveza. Sastoji se od podnivoa za podršku aplikacijama (Application Support Sublayer - APS), ZDO-a (Zigbee Device Object) i aplikacionih objekata (Application Object).
 - (a) Podnivo za podršku aplikacijama obezbjeđuje dvije sprege: APSME-SAP (APS Management Entity Service Access Point) i APSDE-SAP (APS Data Entity Service Access Point). Prva se koristi za bezbjednost, a koriste je i ZDO koordinatori za pristup informacijama sa APS nivoa, dok drugu koriste aplikacioni objekti i ZDO za slanje podataka.
 - (b) ZDO otkriva druge uređaje i servise koje oni nude. Pored toga, uređaj posredstvom ZDO-a šalje odgovore o sebi i svojim servisima drugim uređajima koji to zahtijevaju. Da bi to ostvario, ZDO koristi APSDE-SAP sprege sa APS nivoa i NLME-SAP sa mrežnog nivoa. ZDO je specijalan aplikacioni objekat koji je realizovan na krajnjoj tački broj 0.
 - (c) Aplikacioni objekti su konkretne primjene definisane od strane proizvođača. Određene su profilom koji se koristi i definisane su preko krajnjih tačaka. Krajnja tačka, zajedno sa adresom uređaja, obezbjeđuje jednoznačan način adresiranja individualnog aplikacionog objekta unutar Zigbee mreže.

Pored pomenutih nivoa, opciono je podržan snabdjevač sigurnosnim servisima (Security Service Provider). Njega koriste mrežni i aplikacioni nivo.

3.4.4 Inter-PAN komunikacija

Inter-PAN komunikacija omogućava Zigbee uređajima ograničenu, nesigurnu i po potrebi anonimnu razmjenu informacija sa drugim uređajima u okolini, bez potreba formiranja ili se priključe istoj Zigbee mreži.

Inter-PAN komunikacijom rukuje StubAPS nivo, kome se pristupa kroz INTER-SAP spregu koja je paralelna APSDE-SAP sprezi. Zigbee stek sa StubAPS nivoom prikazan je na Slici 3.14.



Slika 3.14 Zigbee stek sa StubAPS nivoom

3.5 Koraci u automatskom ispitivanju

U saradnji sa projektantima uređaja koji se podvrgava ispitivanju je definisani skup koraka koji je dovoljan da se potvrdi funkcionalnost proizvedenog uređaja.

U nastavku slijedi pregled realizovanih koraka u ispitivanju sa načinom realizacije i objašnjenjima.

3.5.1 Ispitivanje napajanja

Ispitna jedinica se dovodi pod napon napajanja sa naponskog izvora. Ukoliko struja napajanja izađe iz utvrđenog opsega, ispitna jedinica nije zadovoljila uslove ispitivanja. Velika struja ukazuje na postojanje kratkog spoja na ispitnoj jedinici tako da troši isuviše veliku struju. Isuviše mala struja ukazuje na postojanje otvorenog kola, koji opet može biti posljedica lošeg lemljenja ili greške u povezivanju opreme za ispitivanje.

3.5.2 Ispitivanje stabilisanog napona linearnog regulatora

Linearni regulator stabilise napon za rad Atmel AT42QT2160 i tom naponu se može pristupiti na tački 1.8V. Osciloskop se preko jednog releja spaja sa zadatom tačkom, a zatim se mjeri stabilisani napon.

3.5.3 Unos koda u programsku memoriju mikrokontrolera

Programator se dovodi u galvansku vezu sa mikrokontrolerom CC2530 na ispitnoj jedinici. Potom se pokreće aplikacija za unos koda, koja vraća poruke o uspješnosti unosa koda.

3.5.4 Ispitivanje RF komunikacije

RF primopredajnik sa USB spregom ka personalnom računaru čeka poruku sa ispitne jedinice. Ukoliko poruka stigne, to znači da RF komunikacioni dio ispitne jedinice ispravno funkcioniše.

3.5.5 Analiziranje dobijene poruke

Mikrokontroler CC2530 po programiranju izvršava ugrađeni ispit u kome uz pomoć Atmel AT42QT2160 ispituje ispravnost kapacitivnih senzora dodira. Dobijene podatke pakuje u poruku i šalje je na RF primopredajnik sistem za ispitivanje. Analizom poruke se zaključuje o ispravnosti kapacitivnih senzora na ispitnoj jedinici.

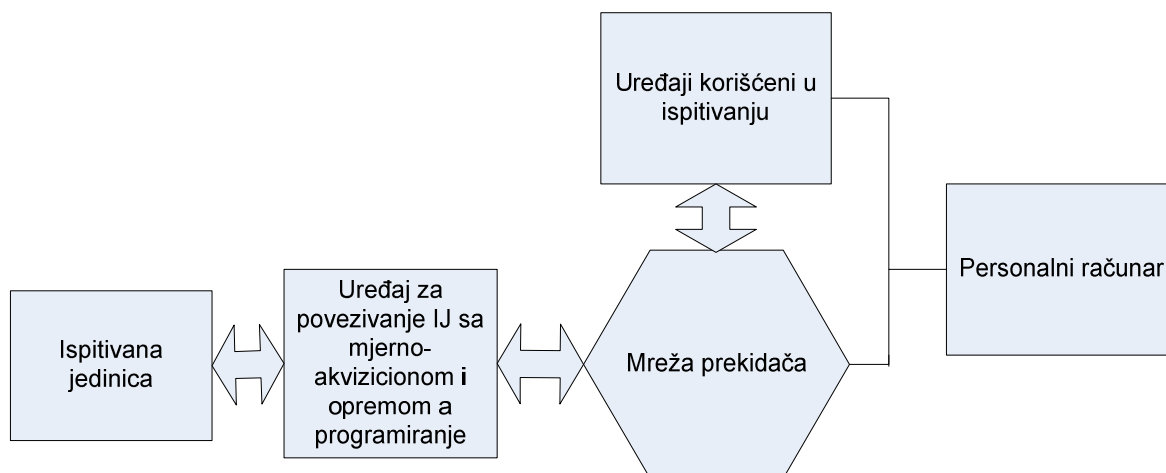
3.6 Zahtjevi za sistem za ispitivanje

Svi koraci u ispitivanju moraju biti automatizovani i, po pokretanju sistema, moraju slijediti jedan za drugim, bez asistiranja operatera. Rezultati mjerenja, podaci o uspješnosti programiranja mikrokontrolera i primljene RF poruke moraju biti upoređeni sa referentnim vrijednostima. Poslije upoređivanja moraju biti generisane vrijednosti Prošao (eng. Pass) ili Pao (eng. Failed), a svi podaci moraju biti arhivirani za neke buduće analize.

U narednim poglavljima je opisana realizacija sistema koji zadovoljava pomenute zahtjeve.

4. Konceptcija rješenja sistema za ispitivanje

U cilju zadovoljenja zahtjeva zadatih od strane projektanata ispitne jedinice, osmišljen je sistem za ispitivanje sa strukturom koja će biti objašnjena u ovom poglavlju.



Slika 4.1 Konceptijska šema sistema za ispitivanje

4.1 Uređaj za povezivanje ispitne jedinice sa mjerno-akvizicionom i opremom za programiranje

Uređaj za povezivanje ispitne jedinice sa mjernom opremom mora da zadovolji sljedeće uslove:

- a) Da podržava pričvršćavanje većeg broja ispitnih jedinica
- b) Konektori na uređaju moraju biti u stanju da izdrže veliki broj povezivanja sa ispitnom jedinicom bez gubitka ili degradiranja funkcije

- c) Postavljanje ispitne jedinice na konektore mora biti jednostavno i intuitivno
- d) Da bude prilagodljiv ispitivanju različitih vrsta PCB-ova.

Imajući na umu ove zahtjeve, odlučeno je da se kao uređaj za pričvršćivanje i povezivanje ispitne jedinice sa mjerno-akvizicionom opremom koristi fiksatura sa igličastim konektorima (eng. Bed of nails). Kao što je prikazano na Slici 2.4, na površini fiksature ove vrste se nalaze igličasti konektori sa oprugama (eng. Pogo pins) na koje se postavlja PCB i preciznim pozicioniranjem, koje se obezbjeđuje vođicama, ostvaruje kontakt sa predviđenim tačkama na ispitnoj jedinici. Igličasti konektori mogu da izdrže do 1.000.000 spajanja i razdvajanja i po ovoj osobini daleko prevazilaze sve standardne konektore u svakodnevnoj upotrebi. Fiksature može da primi onoliko broj ispitnih jedinica koliko joj to površina i maksimalna sila pritiska koju može da proizvede dozvoljavaju. Potrebnu silu pritiska određuje broj igličastih konektora koje treba sabiti i time ostvariti kvalitetan galvanski kontakt. Na **Slici 3.2** se vidi izgled igličastih konektora sa zlatnožutom čahurom u kojoj se nalazi opruga koja potiskuje klip sa, u ovom slučaju, glavom u obliku kupe. Glava igličastih konektora može imati različite oblike (ravni, kupasti, zašiljeni, zaobljeni, u obliku krune sa 4, 6, 9 pera i td.).



Slika 4.2 Izgled igličastih konektora

4.2 Mreža prekidača

Mreža prekidača ima ulogu da omogući da mali broj mjerno-akvizicionih i uređaja za programiranje bude sekvencijalno povezivan na veći broj ispitnih jedinica koje se nalaze na fiksaturi sa igličastim konektorima.

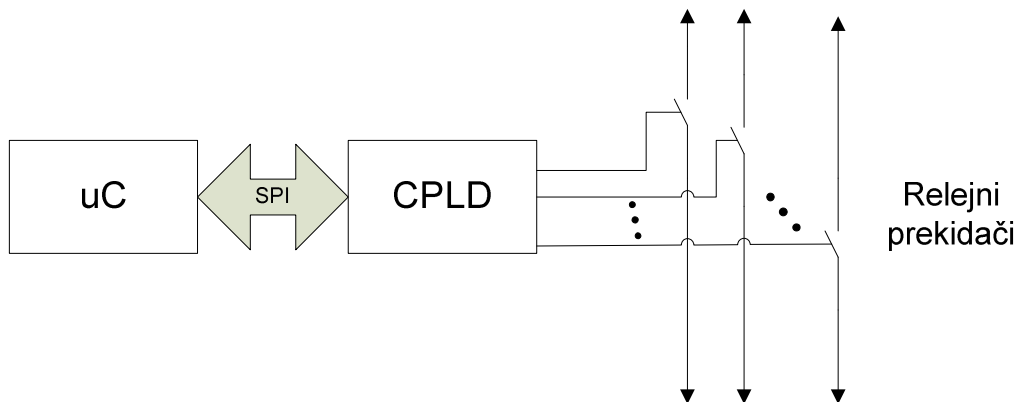
Ovaj uređaj mora da zadovolji sledeće uslove:

- a) Potrebno je da uređaj bude u stanju da signale sa instrumenata vodi ka ispitnim jedinicama i sa ispitnih jedinica ka instrumentima sa što manjim izobličenjem
- b) Potrebno je da uređaj bude u stanju da što veći broj ulaza poveže sa što većim brojem izlaza (idealno da odnos bude N:N, npr. 100:100)
- c) Potrebno je da uređaj bude digitalno upravljiv, kako bi mogao da se poveže u sistem automatskog ispitivanja.

Od prekidačkih elemenata jedino elektromehanički releji su pogodni za ovu vrstu upotrebe. Oni imaju malu serijsku otpornost i male parazitne kapacitivnosti, provode bez izobličenja signale visokih napona (npr. mrežni napon 230V) kao i visoke frekvencije (npr. signal programatora).

Problem kod realizacije posljednjeg zahtjeva je to što su elektromehanički releji relativno glomazne prekidačke komponente i pravljenje uređaja u kome bi bilo koji od 100 ulaza imao isto toliko izlaza bi zahtijevalo postavljanje po 100 releja za svaki ulaz, a to bi rezultovalo matricom 100x100 releja ogromnih dimenzija. Po ovom pitanju je napravljen kompromis, pa su ulazi i izlazi vezani 1:1, tako da ih povezuje jedan relej. Ulazi se dalje spajaju u grupe prema vrsti signala koji provode (npr. 13 ulaza se vežu u jednu tačku na signal uzemljenja - GND).

Digitalna upravljivost se realizuje pravljenjem uređaja sa mikrokontrolerom koji je zadužen za komunikaciju sa personalnim računarom. Mikrokontroleri obično nemaju veliki broj izlaza preko kojih se može kontrolisati mnogo prekidača, pa se u tu svrhu koristi neki uređaj sa velikim brojem izlaza, u ovom slučaju CPLD uređaj (eng. Complex Programmable Logical Device). Ovaj uređaj se u VHDL programskom jeziku programira da vrši određenu funkciju, u ovom slučaju da održava serijsku komunikaciju sa mikrokontrolerom preko SPI protokola, i da na osnovu dobijene poruke pali ili gasi jedan od releja.



Slika 4.3 Konceptijska šema prekidačke mreže

4.3 Razmatranje mogućnosti za ispitivanje kapacitivnih senzora dodira

Cilj ispitivanja je provjera funkcionalnosti senzora koja može biti narušena zbog grešaka nastalih u proizvodnom procesu. Ispitivanje se može obaviti analizom odziva senzora u pobuđenom i nepobuđenom stanju za što je neophodno koristiti dodatne uređaje kojima bi se vršilo pobuđivanje senzora, odnosno simulacija dodira, ili samo u nepobuđenom stanju što se može realizovati samo programskim putem, bez simulacije dodira.

4.3.1 Ispitivanje senzora simulacijom dodira

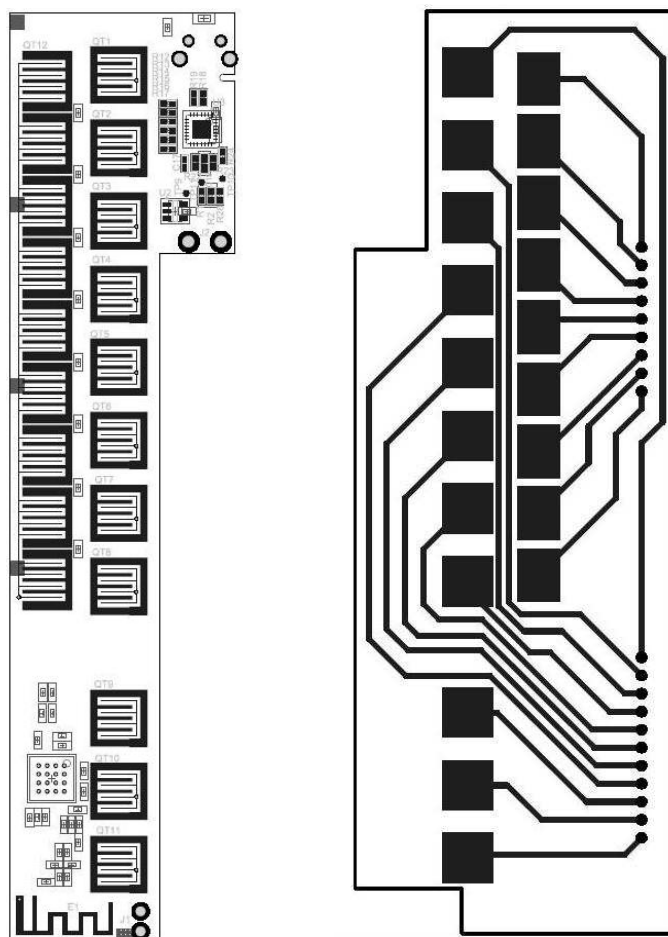
Kod ispitivanja senzora simulacijom dodira, analizira se odziv senzora u pobuđenom i nepobuđenom stanju. Razmotrene su dvije mogućnosti: simulacija dodira pomoću ploče sa elektrodama ili pomoću uređaja sa pneumatskim prstima.

4.3.1.1 Simulacija dodira pomoću ploče sa elektrodama

Na štampanoj ploči se nalaze elektrode u vidu bakarnih površina koje su povezane sa konektorima preko kojih ove elektrode mogu da se uzemlje. Ploča je postavljena na presu sa igličastim konektorima preko panela sa ispitnim jedinicama i pozicionirana tako da se svaka elektroda preklopi sa odgovarajućim tasterom. Preko površine štampane ploče za ispitivanje je nalijepljena plastika iste vrste kao i ona koja se koristi za izradu kućišta daljinskog upravljača. Isti tasteri na svim daljinskim upravljačima koji se ispituju su povezani paralelno, na jednu nožicu konektora. Svaka nožica konektora preko jednog releja sa relejne ploče se može spojiti ili odspojiti sa uzemljenja.

Simulacija dodira prstom nekog tastera se izvodi uzemljenjem elektrode koja se nalazi iznad njega. Na taj način uzemljuju se sve elektrode koje odgovaraju istim tasterima, pošto su spojene paralelno na zajedničku nožicu, ali softver za automatsko ispitivanje napaja samo jedan daljinski upravljač i sa njega se RF komunikacijom očitava odziv tastera koji se ispituje.

Potencijalni problem koji se nameće pri ispitivanju svakog pojedinačnog tastera unutar ovog sistema je uticaj okolnih elektroda i provodnih linija na ploči za ispitivanje koje su, iako neuzemljene u trenutku ispitivanja, fizički prisutne na štampanoj ploči. Tu je i sama presa koja je uglavnom izrađena od metala. Sve to unosi dodatnu parazitnu kapacitivnost i prijeti da svojim uticajem poremeti očekivani odziv senzora.



Slika 4.4 PCB daljinskog upravljača i PCB sa elektrodama

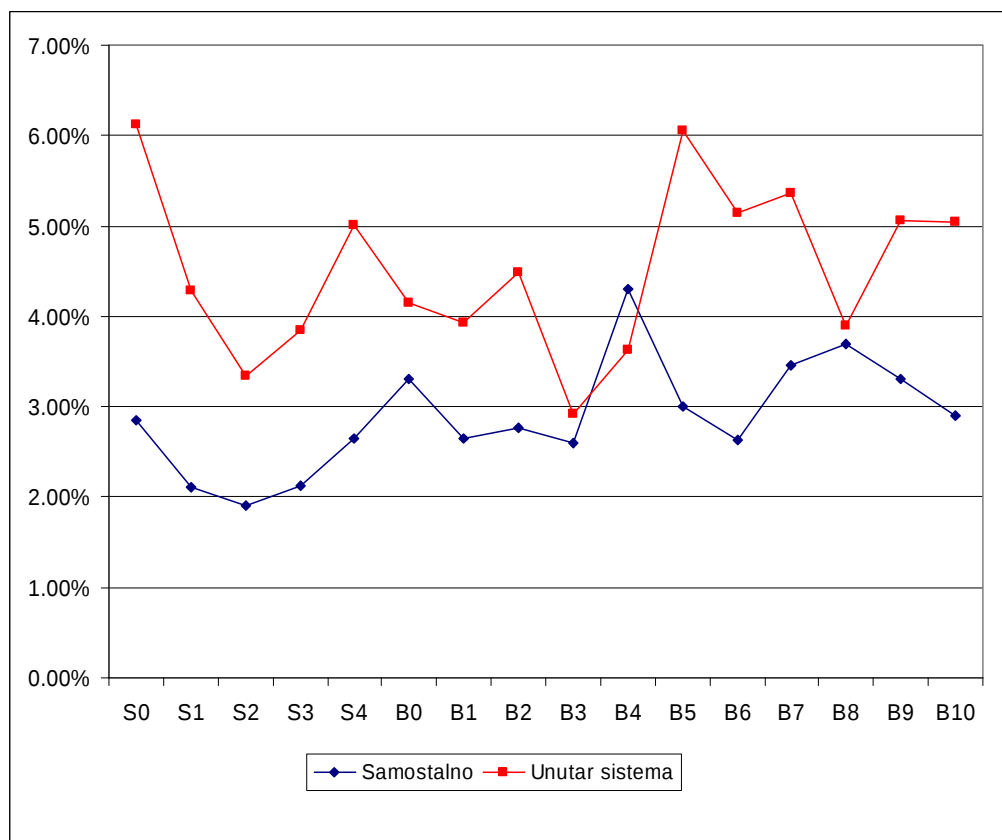
Da bi se izveli zaključci o upotrebljivosti ovakvog načina ispitivanja, napravljena je pločica sa elektrodama za jedan daljinski upravljač. Na **Slici 4.4** su prikazane PCB daljinskog upravljača i PCB sa elektrodama. Mjeren je odziv senzora pri simulaciji dodira pomoću elektroda koje se nalaze na toj ploči i pri korišćenju daljinskog upravljača kao gotovog proizvoda. Rezultati su predstavljeni u vidu relativne promjene jačine signala pri prelasku iz nepobuđenog (taster nije pritisnut) u pobuđeno stanje (taster pritisnut) u odnosu na jačinu signala u nepobuđenom stanju:

$$P[\%] = \frac{(S_{\text{nije pritisnut}} - S_{\text{pritisnut}})}{S_{\text{nije pritisnut}}} * 100$$

Na Slici 4.5 je prikazan grafik sa rezultatima mjerenja. Plava linija predstavlja rezultate u slučaju korišćenja daljinskog upravljača samostalno, kao gotovog proizvoda, a crvena u slučaju

ispitivanja unutar sistema za ispitivanje. Sa S0 do S4 su označeni rezultati mjerenja sa senzora klizača, a sa B0 do B10 rezultati mjerenja sa tastera.

Prosječna relativna promjena jačine signala očitnog sa svih senzora u prvom slučaju je 2.89%, a u drugom 4.52%. Na ovaj način je pokazano da senzori reaguju na ovakav način stimulacije, te da je odziv istog reda veličine kao i odziv pri korišćenju daljinskog upravljača kao gotovog proizvoda.



Slika 4.5 Rezultati mjerenja

4.3.1.2 Simulacija dodira pomoću uređaja sa pneumatskim prstima

Razmotrena je i mogućnost upotrebe uređaja sa 16 pneumatskih prstiju. Njih čine cilindri u kojim se nalaze pneumatski gonjeni klipovi. Pneumatski prsti moraju da budu povezani na uzemljenje da bi kapacitivni senzori reagovali na njihovo prisustvo.

Problem pri ovakvom načinu ispitivanja bio bi problematičan način ugrađivanja uređaja na presu sa igličastim konektorima, posebno imajući u vidu da bi za svaki uređaj bilo potrebno obezbijediti 16 prstiju, a za ispitivanje cijelog proizvodnog panela 12 puta više. Cijena takvog sistema bi bila velika, što predstavlja dodatnu otežavajuću okolnost.

4.3.2 Ispitivanje senzora bez simulacije dodira

AT42QT2160 senzorsko integrisano kolo periodično očitava odziv senzora. Registrovanje dodira zasnovano je na otkrivanju promjene kapacitivnosti. Ta očitavanja nisu jednaka nuli kada senzor nije pobuđen, već imaju neku vrijednost koja zavisi od okolnih parazitnih kapacitivnosti.

Na osnovu vrijednosti odziva sa senzora u nepobuđenom stanju mogu se dijagnostifikovati neke od nepravilnosti kao što su nedostatak otpornika ili kondenzatora u akvizicionom kolu, ugrađene komponente pogrešnih vrijednosti, ili oštećenja senzorskih elektroda u štampanoj ploči. Nedostatak otpornika ili kondenzatora u akvizicionom kolu rezultuje nultim odzivom, a pogrešne vrijednosti ovih komponenata utiču na brzinu punjenja i pražnjenja probnog kondenzatora, što se direktno odražava na očitani odziv. Slično se manifestuju i oštećenja senzorskih elektroda.

Prednost ovakvog načina ispitivanja je prije svega što ne zahtijeva dodatna ulaganja u fizičku arhitekturu sistema za ispitivanje. S obzirom na nedostatke prethodno navedenih i prednosti ove metode, odlučeno je da se senzori ispituju programski, bez simulacije dodira.

4.4 Uređaji korišćeni u ispitivanju

Uređaji korišćeni u ispitivanju obuhvataju pomoću personalnog računara upravljive mjerno-akvizicione instrumente, uređaje za napajanje, uređaje za programiranje i uređaje za RF primopredaju. Ovaj skup uređaja je predviđen da bude proširiv na sve vrste uređaja koje neko buduće ispitivanje bude zahtijevalo.

4.4.1 Mjerno-akviziciona oprema

Mjerno-akviziciona oprema, pored mogućnosti da mjeri potrebne veličine, mora zadovoljavati sljedeća dva ključna kriterijuma:

- a) Digitalna upravljivost
- b) Garantovana preciznost mjerenja

Imajući ova dva zahtjeva u vidu, odlučeno je da bude upotrebljen digitalno upravljivi osciloskop. Većina digitalno upravljivih osciloskopa posjeduje širok dijapazon mogućnosti mjerenja parametara napona sa zadovoljavajućom preciznošću.

4.4.2 Uređaji za napajanje

Potrebe ispitivanja u ovom radu su takve da je ispitnoj jedinici neophodno dovoditi napone reda 1V sa strujama reda desetine mA. Iste struje je neophodno i mjeriti. Ove uslove zadovoljava digitalno upravljiv laboratorijski naponski izvor.

4.4.3 Programator

Za programiranje mikrokontrolera na ispitnim jedinicama uzima se programator koji proizvođač nudi za datu seriju mikrokontrolera.

4.4.4 RF primopredajnik

Za prijem radio frekvencijskih poruka sa ispitnih jedinica koristi se RF primopredajnik sa atestiranom prijemnom antenom i provjereno dobrih karakteristika.

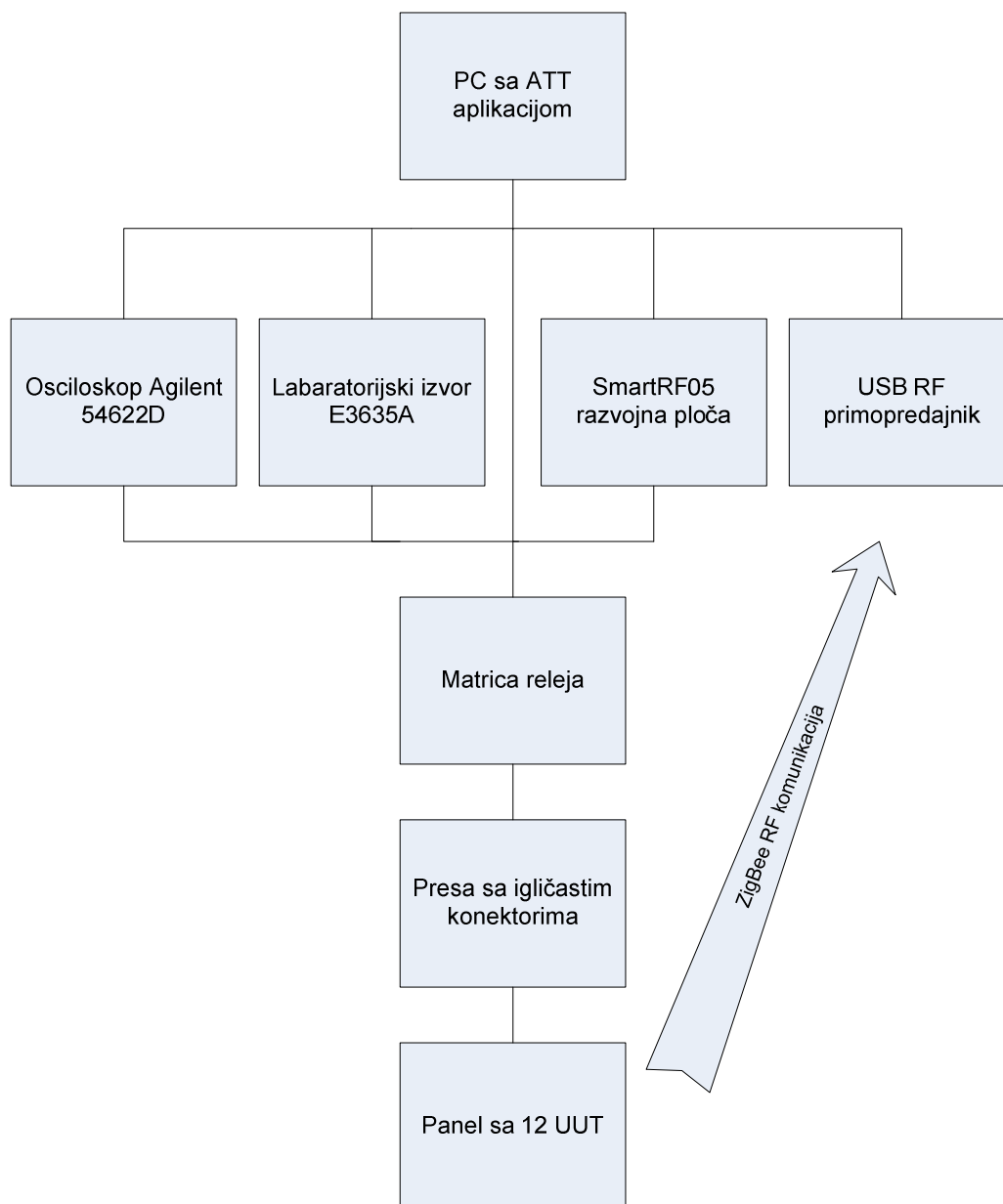
4.5 Personalni računar sa aplikacijom za upravljanje izvođenjem ispitivanja

Za upravljanje svim digitalno upravljivim uređajima koristi se personalni računar sa aplikacijom za upravljanje ispitivanjem. Personalni računar mora posjedovati fizičke mogućnosti komunikacije sa svim pomenutim uređajima, dok aplikacija mora omogućiti kontrolu nad svim pomenutim digitalno upravljivim uređajima i omogućiti sekvencijalno izvođenje koraka ispitivanja.

5. Opis sistema za ispitivanje

Sistem za ispitivanje čine sljedeći uređaji:

1. presa sa igličastim konektorima (eng. bed-of-nails)
2. računarom upravljiva ploča releja
3. računarom upravljiv naponski izvor sa mjerenjem struje
4. računarom upravljiv osciloskop
5. programator
6. RF primopredajnik
7. bar kod čitač
8. personalni računar sa aplikacijom za automatsko ispitivanje



Slika 5.1 Blok šema sistema za ispitivanje

Blok šema sistema za ispitivanje je data na **Slici 5.1**. Presa fizički povezuje ispitne jedinice, u ovom slučaju daljinske upravljače, sa uređajima sistema za ispitivanje. Povezivanje je ostvareno pomoću specijalnih sondi koje presa precizno pozicionira na ispitne tačke štampane ploče ispitne jedinice. U cilju ubrzavanja procesa ispitivanja na presu se istovremeno postavlja više ispitnih jedinica, a pošto je moguće ispitivanje samo jedne ispitne jedinice u jednom trenutku, neophodno je preusmjeriti ispitni signal na onu jedinicu koja se ispituje. To omogućava ploča sa relejima. Za napajanje ispitnih jedinica koristi se naponski izvor sa mjerenjem struje. U sistemu je prisutan programator koji se koristi za upisivanje softvera na mikrokontroler ispitne

jedinice, kao i RF primopredajnik za komunikaciju sa ispitnom jedinicom. Za očitavanje serijskog broja ispitne jedinice prije početka ispitivanja koristi se bar kod čitač. Svi ispiti su unaprijed definisani i njih automatski izvršava specijalizovana aplikacija koja se pokreće sa računara koji je dio sistema za ispitivanje.

5.1 Presa sa igličastim konektorima

Presa sa igličastim konektorima (**Slika 5.2**) je centralni uređaj sistema za ispitivanje. Ona posjeduje pouzdan mehanizam za precizno pozicioniranje sonde sa ugrađenom oprugom (engl. pogo pins) na ispitne tačke na štampanoj ploči ispitne jedinice.



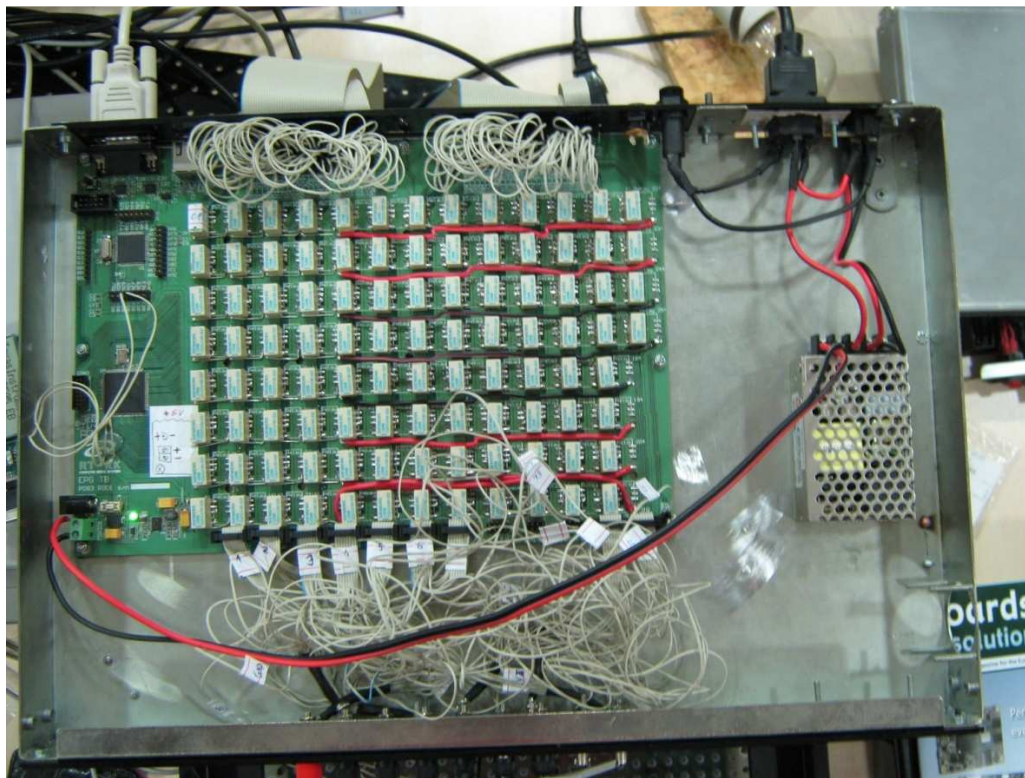
Slika 5.2 Checksum TR-5-400-QC presa

Postoje prese sa mehaničkim, elektro-mehaničkim, vakumskim i pneumatskim mehanizmom pričvršćivanja sonde, a ključni faktor za odabir mehanizma je ukupan broj ispitnih tačaka na ispitnim jedinicama koje su postavljene na presu. U ovom sistemu za ispitivanje koristi se mehanička presa Checksum TR-5-400-QC. Podržava ispitivanje pomoću najviše 400 sonde, a maksimalna površina štampane ploče koja može da se ispituje je 300 mm x 216 mm. Glavna prednost u odnosu na druge prese je mala cijena i mali troškovi prilagođavanja sistema za ispitivanje druge ispitne jedinice. Koriste se sonde sa vrhom u obliku krune promjera 56 mila [9].

5.2 Računarom upravljiva ploča releja

Sve ispitne jedinice koje se u jednom trenutku nalaze na presi su paralelno povezane na preostale uređaje sistema za ispitivanje. Kako u jednom trenutku moguće ispitivati smo jednu ispitnu jedinicu, neophodno je u sistem uvesti uređaj sa prekidačkim elementima koji omogućuju biranje pojedinačnih ispitnih jedinica. Za tu namjenu isprojektovana je ploča sa sto prekidačkih elemenata koja je prikazana na **Slici 5.3**.

Iako to nije bilo potrebno za ispitivanja daljinskih upravljača, pri izboru prekidačkih elemenata bilo je neophodno obezbjediti da oni mogu da provode i visokonaponske naizmjenične signale, da bi se ploča sa relejima mogla iskoristiti za eventualno ispitivanje viskokonaponskih uređaja. Kao prekidački elementi uzeti su releji P2 V23079-D1001-B301 proizvođača Siemens. To su DPDT (Double Pole Double Throw) releji koji mogu da izdrže maksimalnu konstantnu struju od 2A ili 5A u prekidačkom režimu, te maksimalan napon od 250V u AC i 220V u DC režimu. Na ploči se nalazi mikrokontroler PIC18F97J60-X/PF koji matricom od 100 releja upravlja preko Xilinx CoolRunner-II XCR3512XL CPLD (engl. Complex programmable logic device) kola. Mikrokontroler upravlja CPLD kolom putem SPI (engl. Serial Peripheral Interface) sprege. Pločom je moguće upravljati pomoću računara putem RS 232 ili Ethernet sprege.



Slika 5.3 Računarom upravljiva ploča releja

5.3 Računarom upravljiv naponski izvor

Za napajanje ispitnih jedinica koristi se Agilent E3631A naponski izvor (**Slika 5.4**) sa mogućnosti mjerenja struje. On posjeduje tri kanala:

Kanal 1: 0 to 6 V, 0 do 5 A

Kanal 2: 0 to +25 V, 0 do 1 A

Kanal 3: 0 to -25 V, 0 do 1 A.

Ovaj naponski izvor je računarom upravljiv putem GPIB (engl. General Purpose Interface Bus) ili RS-232 sprege, a programira se koristeći SCPI (engl. Standard Commands for Programmable Instruments) komande [10].

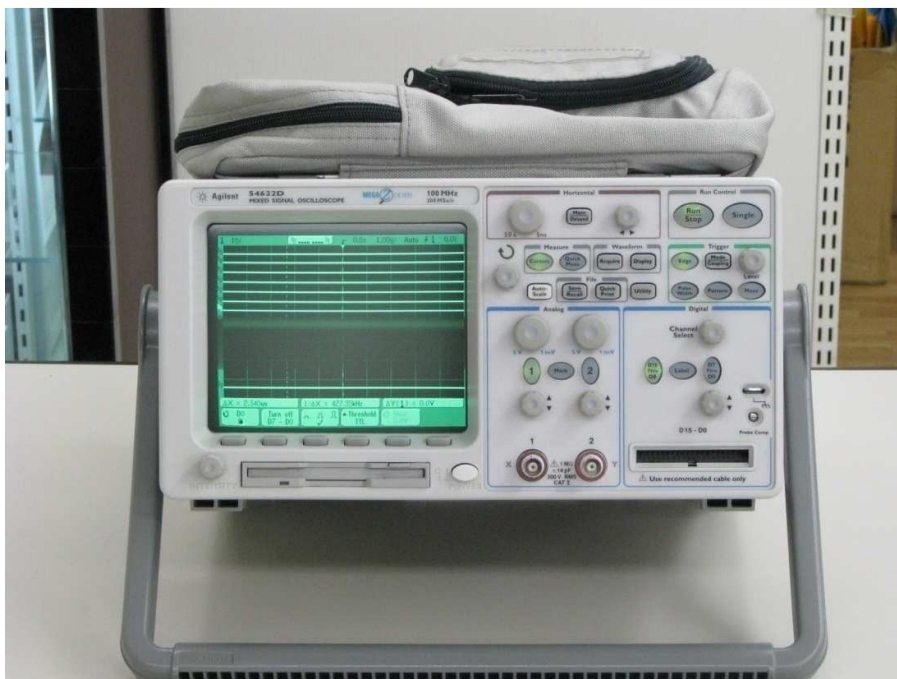


Slika 5.4 Agilent E3631A

5.4 Računarom upravljiv osciloskop

Za ispitivanja napona na lokalnom stabilizatoru napona daljinskog upravljača koristi se dvokanalni osciloskop Agilent 54622d (**Slika 5.5**). Mjeri se srednja vrijednost signala, a radi sto

preciznijeg mjerenja potrebno je koristiti funkcije za skaliranje signala po vremenskoj i naponskoj osi. Ovaj osciloskop je računarom upravljiv putem GPIB (engl. General Purpose Interface Bus) ili RS-232 sprege [11].



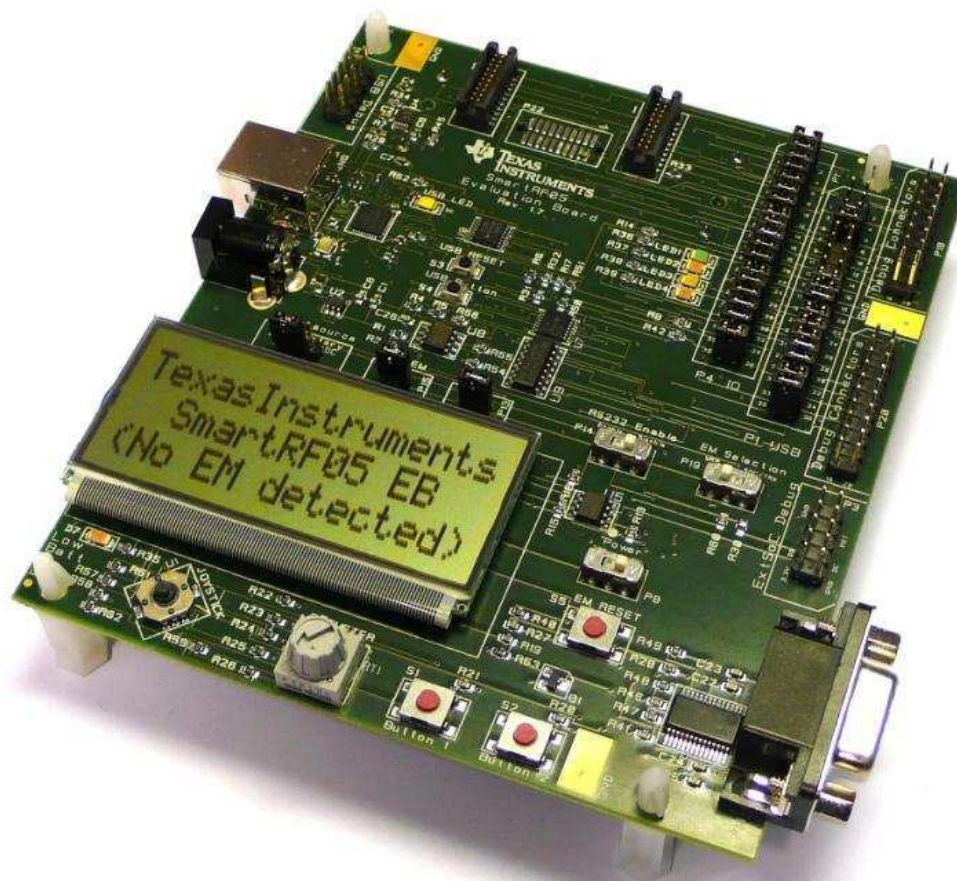
Slika 5.5 Agilent 54622d

5.5 Programator

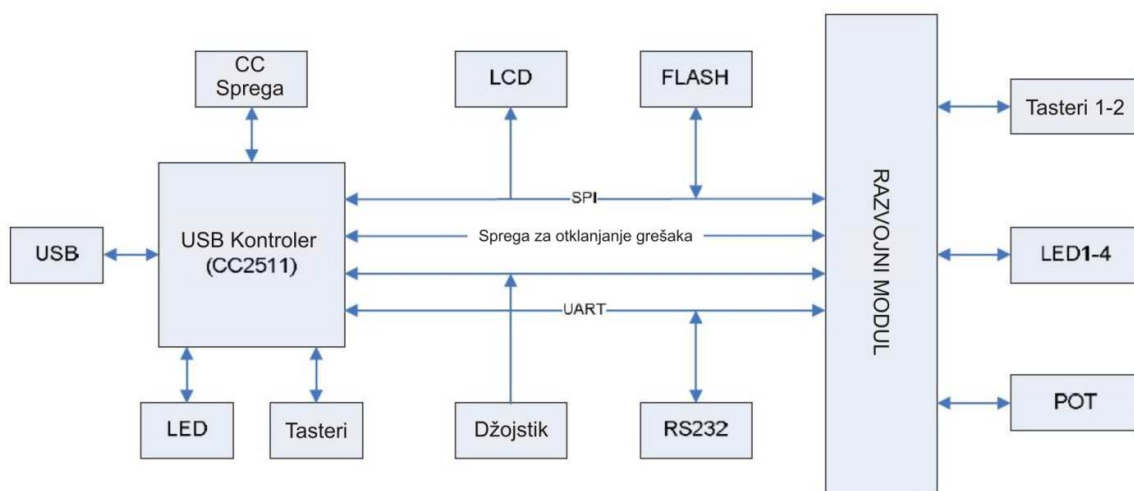
Za potrebe programiranja ispitnih jedinica koristi se Texas Instruments SmartRF 05 razvojna ploča (engl. Evaluation Board). SmartRF 05 razvojna ploča sadrži:

- serijski LCD sa 3 x 16 karaktera
- USB 2.0 spregu
- UART (engl. Universal Asynchronous Receiver/Transmitter)
- LED diode
- serijsku fleš memoriju
- potencijometar
- džojstik
- tasteri

Razvojna ploča je platforma za RF razvojni modul (engl. Evaluation Module) sa kojim zajedno čini razvojni sistem.

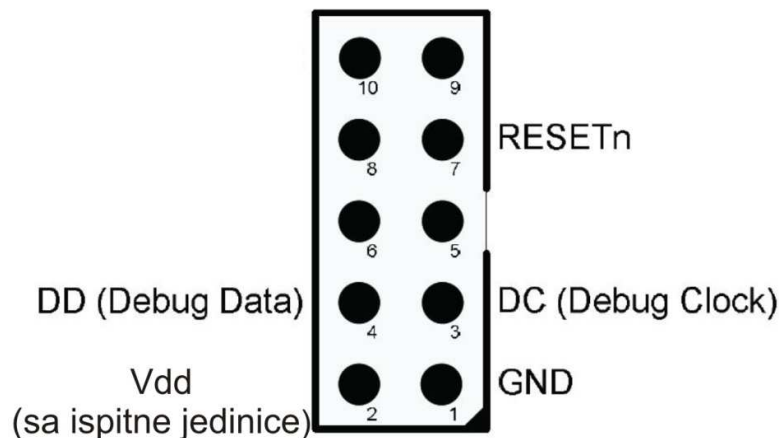


Slika 5.6 SmartRF05 Razvojna ploča



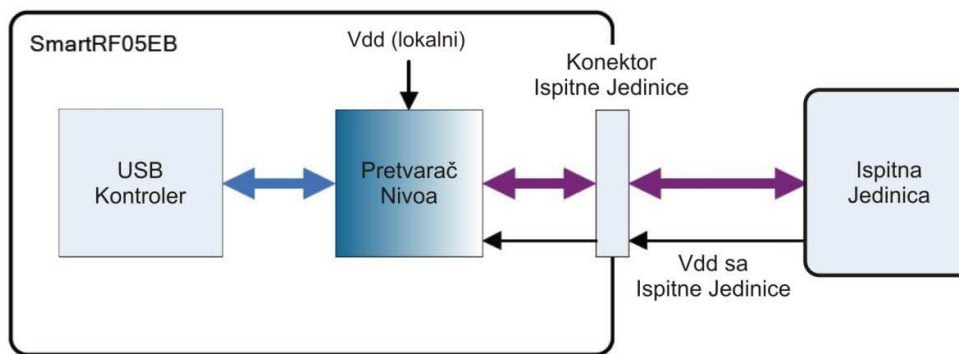
Slika 5.7 Arhitektura razvojne ploče SmartRF05

Ispitne jedinice se programiraju preko konektora za otklanjanje grešaka i programiranje (P3 ExtSoc Debug). Pinovi ovog konektora su prikazani na **Slici 5.8**.



Slika 5.8 P3 ExtSoc Debug konektor

Na SmartRF05 razvojnoj ploči postoji pretvarač naponskog nivoa između unutrašnjih kola i konektora na koji se spaja ispitna jedinica. Da bi komunikacija između ploče i ispitne jedinice ispravno funkcionisala, na pretvarač naponskog nivoa mora biti doveden napon napajanja ispitne jedinice koju on koristi kao naponsku referencu za ostale signale (**Slika. 5.9**). Naponski pretvarač omogućuje da ispitna jedinica bude napajana napnom koji se znatno razlikuje od 3.3V, napona napajanja SmartRF05 razvojne ploče [12].



Slika 5.9 Pretvarač nivoa signala konektora ispitne jedinice

5.6 RF Primopredajnik

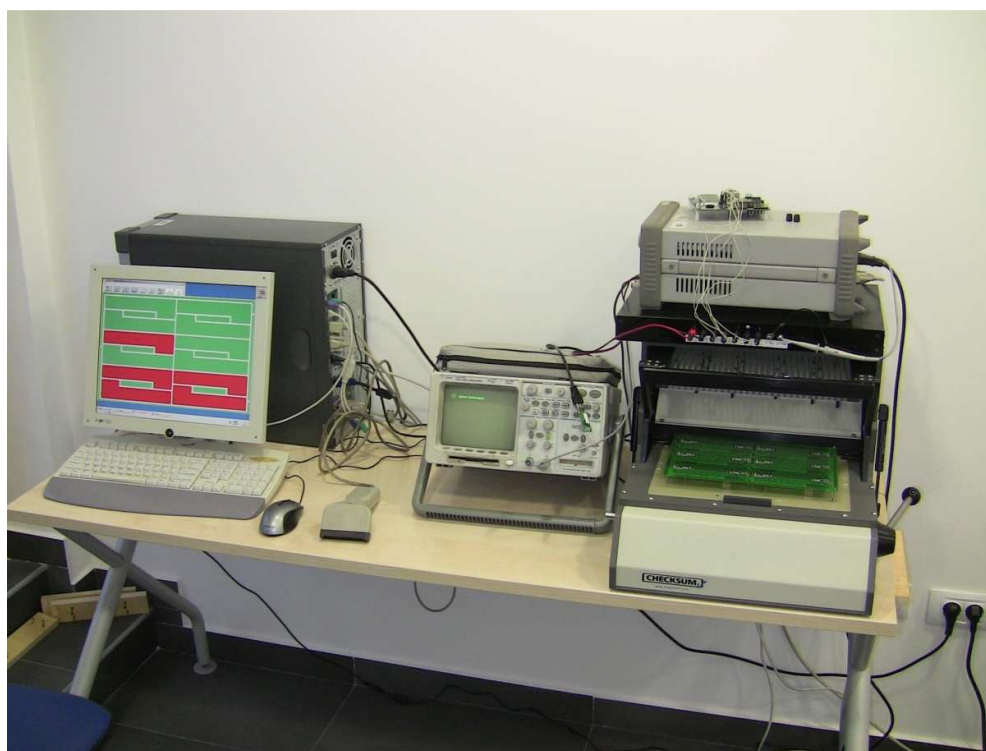
Za ispitivanje ispravnosti RF komunikacije ispitnih jedinica koristi se Texas Instruments CC2531 USB pimopredajnik (**Slika 5.10**). Pored ispitivanja RF komunikacije, ovaj

primopredajnik služi za prijem informacije o ispravnosti kapacitivnih senzora dodira ispitnih jedinica.

CC2531 USB primopredajnik je uređaj koji se preko USB sprege priključuje na računar. Podržava ZigBee/IEEE 802.15.4 standard bežične komunikacije. Ima ugrađene dvije LED diode, dva tastera i konektor koji joj omogućava da se poveže na druge uređaje [13].



Slika 5.10 CC2531 USB primopredajnik



Slika 5.11 Izgled kompletnog sistema za ispitivanje

6. Realizacija programske podrške

Uloga programske podrške daljinskog upravljača koja je opisana u ovom odjeljku je ispitivanje funkcionalnosti kapacitivnih senzora dodira, te slanje poruke sa rezultatima ispitivanja čime se verifikuje ispravnost RF komunikacije ispitne jedinice.

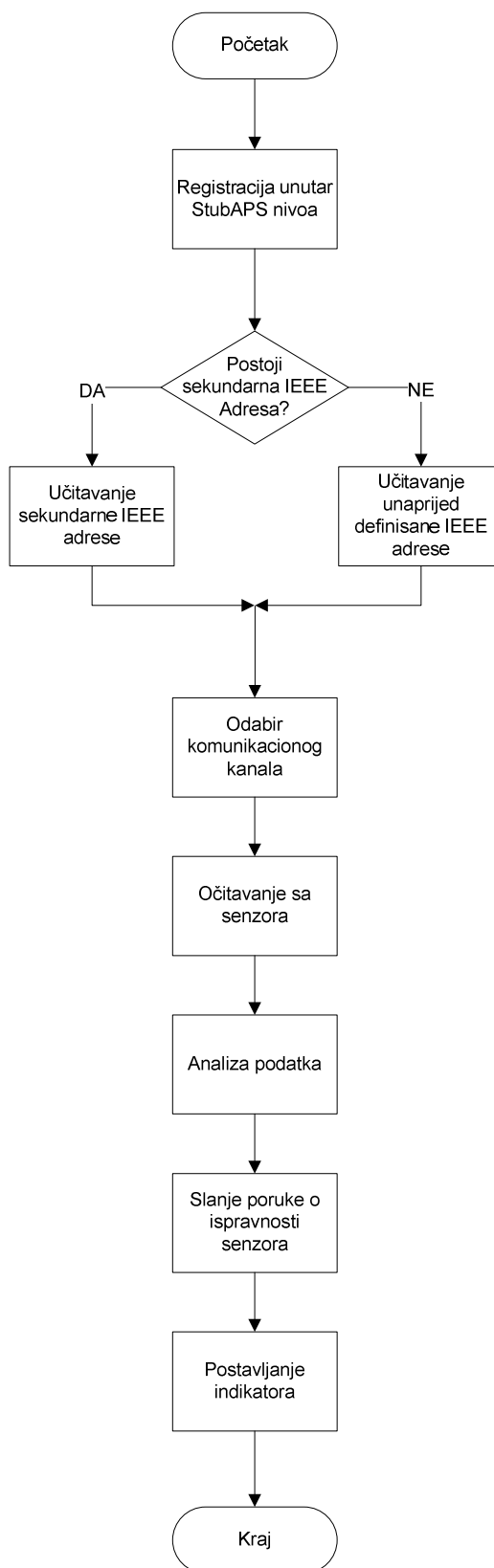
Programska podrška za ispitivanje kapacitivnih senzora dodira dio je programske podrške daljinskog upravljača i realizovana je u vidu zasebnog programskog modula.

Ispitivanje se izvršava samo jednom, nakon prvog paljenja daljinskog upravljača poslije programiranja. U stalnoj memoriji CC2530 mikrokontrolera, u vidu jednobitnog indikatora, čuva se informacija o tome da li je ispitivanje obavljeno. Pošto se daljinski upravljač upali, u potprogramu za inicijalizaciju se provjerava da li je ispitivanje već izvršeno. Ukoliko jeste, ispitivanje se preskače i nastavlja se sa inicijalizacijom, a u suprotnom, izvršava se kod programskog modula za ispitivanje.

Daljinski upravljač je unutar ZigBee mreže definisan kao kranji uređaj (end device). USB RF primopredajnik kome se šalju rezultati ispitivanja nije član mreže za koju je daljinski upravljač konfigurisan, tako da se poruka šalje posredstvom Inter PAN komunikacije. Inter PAN komunikacija se inicijalizuje registracijom unutar StubAps nivoa, što je i prvi korak u glavnom algoritmu programske podrške za ispitivanje koji je prikazana na **Slici 6.1**.

Pri programiranju daljinskog upravljača, programatoru se kao parametar može zadati IEEE adresa koja se upisuje na sekundarnu IEEE lokaciju CC2530 mikrokontrolera. Treći korak glavnog algoritma programske podrške je učitavanje IEEE adrese RF primopredajnika. Ukoliko postoji adresa upisana na sekundarnu IEEE lokaciju, ta adresa se uzima kao adresa RF primopredajnika na koji se šalje poruka sa rezultatima ispitivanja. U suprotnom, uzima se fiksna adresa koja je u programu navedena kao konstanta. Na ovaj način ostavljena je mogućnost da se

poruka sa rezultatima ispitivanja pošalje na bilo koju adresu koja se programatoru proslijedi kao parametar pri programiranju.



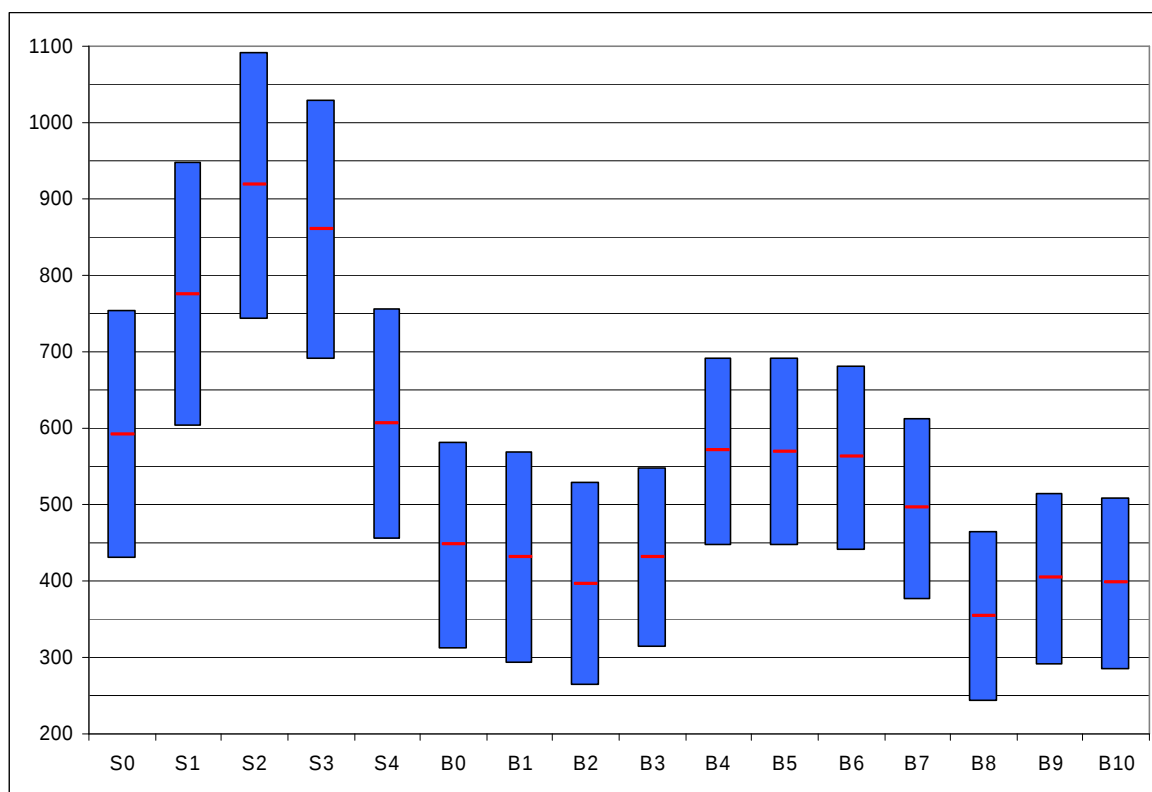
Slika 6.1 Glavni algoritam programske podrške

Nakon upisa vrijednosti komunikacionog kanala, te očitavanje odziva senzora, prelazi se na analizu podataka. U potprogramu za analizu podataka se provjeravaju očitavanje vrijednosti i formira poruka o ispravnosti senzora.

Na kraju glavnog algoritma se šalje poruka o ispravnosti senzora na RF primopredajnik i podiže indikator u stalnoj memoriji da je ispitivanje obavljeno.

6.1 Analiza vrijednosti očitanih sa senzora

Očitana vrijednost jačine odziva sa senzora mora da bude u opsegu određenom prethodno utvrđenim referentnim vrijednostima odziva tastera, i vrijednošću $\Delta_{\max}$, koja predstavlja maksimalno dozvoljeno odstupanje očitane vrijednosti odziva od referentne. Vrijednosti $\Delta_{\max}$ se, kao i referentne vrijednosti, utvrđuje za svaki taster posebno. Dakle, da bi se taster mogao smatrati ispravnim, vrijednost njegovog odziva mora biti u $\Delta_{\max}$ okolini referentne vrijednosti odziva tog taster. To je prikazano na grafiku na **Slici 6.2**.



Slika 6.2 Ispravni opsezi vrijednosti očitanih sa senzora

Na horizontalnoj osi su sa S0 do S5 označeni senzori koji čine klizač, a sa B0 do B10 senzori tastera. Na vertikalnoj osi je označena jačina odziva u bezdimenzionalnim jedinicama.

Horizontalne crvene linije označavaju referentne vrijednosti odziva za svaki od kanala. Plave, trakaste površine označavaju zonu u kojoj je odziv sa tastera ispravan, i predstavljaju $\Delta_{\max}$ okolinu referentnih vrijednosti.

Da bi se odredile referentne i $\Delta_{\max}$ vrijednosti, mjeren je odziv tastera sa svih 12 daljinskih upravljača jednog proizvodnog panela, za koje je prethodnom provjerom utvrđeno da su ispravni. Ove dvije veličine se smještaju u nizove $RV[i]$ i $\Delta_{\max}[i]$, gdje je $i \in (1, 16)$ redni broj senzora. Za referentnu vrijednost odziva nekog senzora uzima se aritmetička sredina odziva sa tog senzora sa svih 12 daljinskih upravljača:

$$RV[i] = \frac{\sum_{j=1}^{12} S_{i,j}}{12},$$

gdje je $j \in (1, 12)$ redni broj daljinskog upravljača na proizvodnom panelu. Vrijednost $\Delta_{\max}$ nekog senzora se računa kao veća od Δ^+ i Δ^- vrijednosti tog senzora:

$$\Delta_{\max}[i] = \max(\Delta^+[i], \Delta^-[i]).$$

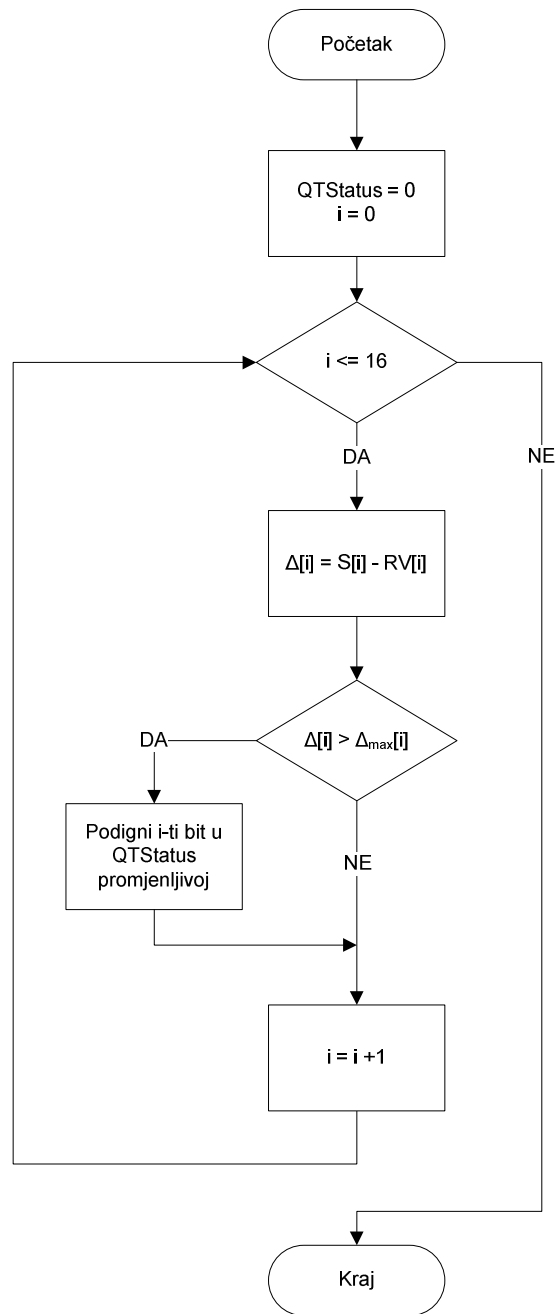
Vrijednost Δ^+ nekog senzora je razlika maksimalnog i referentnog odziva sa tog senzora:

$$\Delta^+[i] = \max[S_{i,j}] - RV[i], \quad j \in (1, 12).$$

a Δ^- je razlika referentnog i minimalnog odziva:

$$\Delta^-[i] = RV[i] - \max[S_{i,j}], \quad j \in (1, 12).$$

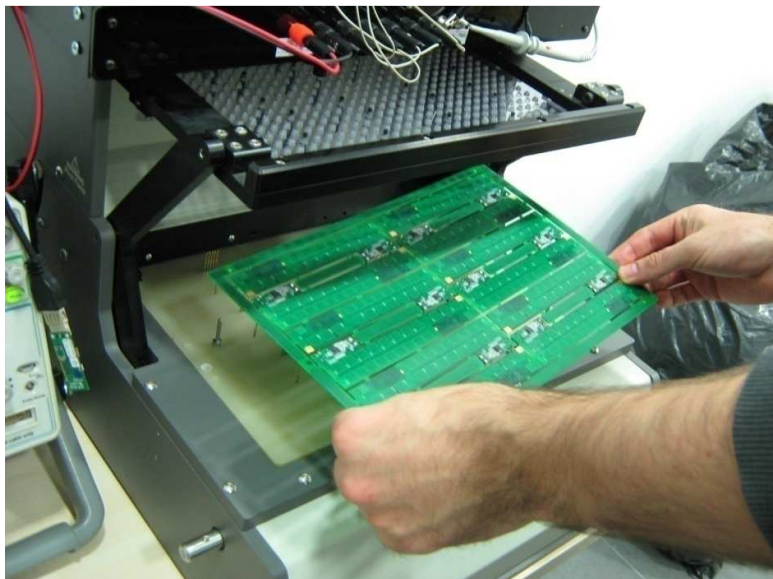
Podaci o ispravnosti senzora se smještaju u 16 – bitnu promjenljivu QTStatus. Svakom senzoru odgovara po jedan bit, pri čemu 1 označava da je senzor neispravan. Podalgoritam za analizu očitanih podataka prikazan je na **Slici 6.3**.



Slika 6.3 Podalgoritam analiza podataka

7. Proces ispitivanja

Proces ispitivanja počinje postavljanjem proizvodnog panela koji sadrži 12 PCB-ova daljinskih upravljača na sonde pričvršćene na presi, kao što je prikazano na **Slici 7.1**.



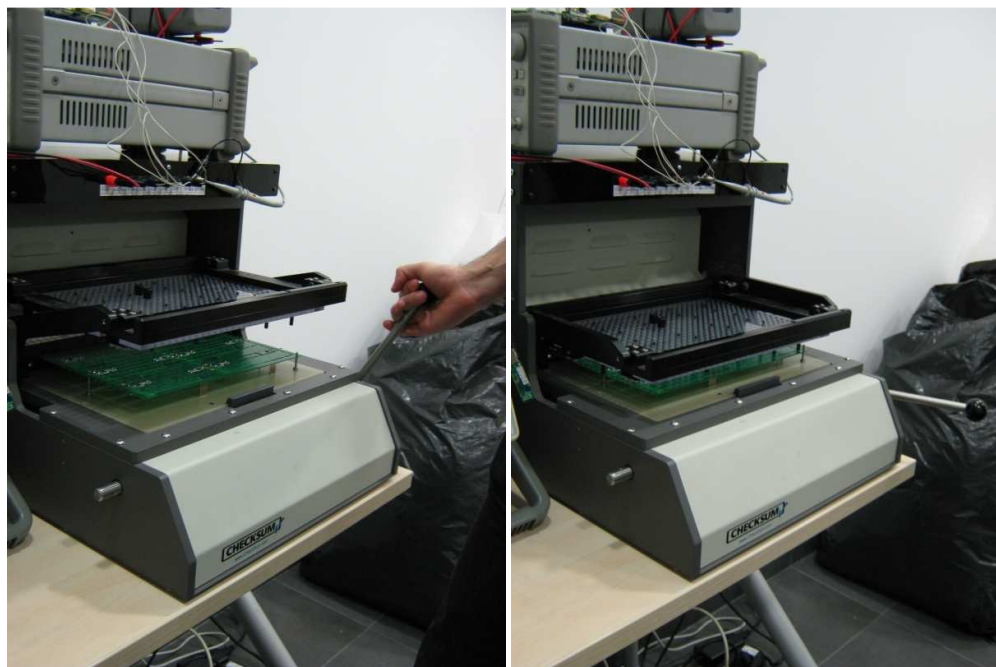
Slika 7.1 Postavljanje panela na presu sa igličastim konektorima

Spuštanjem poluge prese dolazi do kontakta vrhova sonde sa tačkama za ispitivanje (**Slika 7.2**). Preko ovih galvanskih kontakata se vrši ispitivanje.

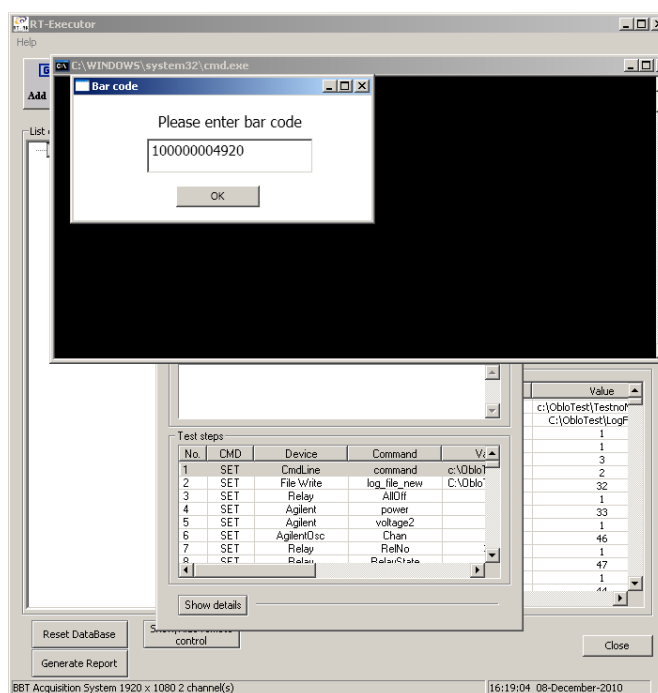
Po završenom postavljanju ispitnih jedinica na presu, pokreće se program za automatsko izvršavanje ispitivanja - RT Executor. Ovaj program upravlja radom svih uređaja sistem za ispitivanje. Za sve uređaje je napisana programska podrška koje ovaj program objedinjuje. Na

osnovu liste koraka pri ispitivanju koji se navode u datoteci određenoj za to, program sukcesivno izvršava pojedinačne ispite.

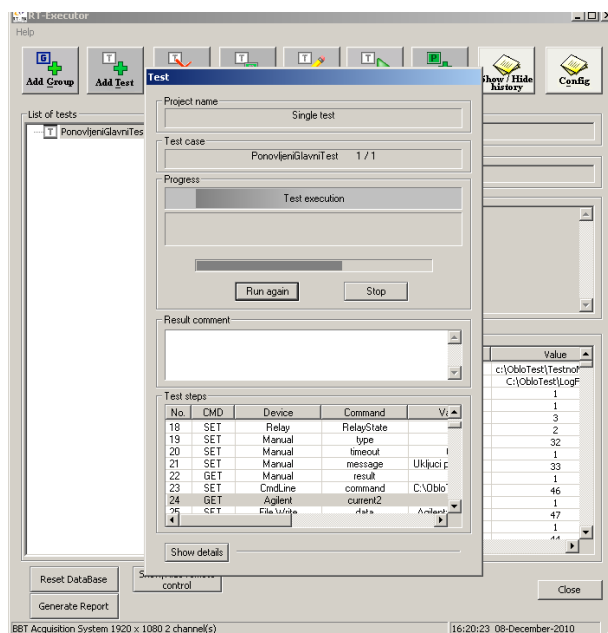
Na početku automatskog dijela se inicijalizuju svi uređaji. Potom se pokreće izvršavanje koraka ispitivanja definisanih u datoteci.



Slika 7.2 Spuštanje poluge prese



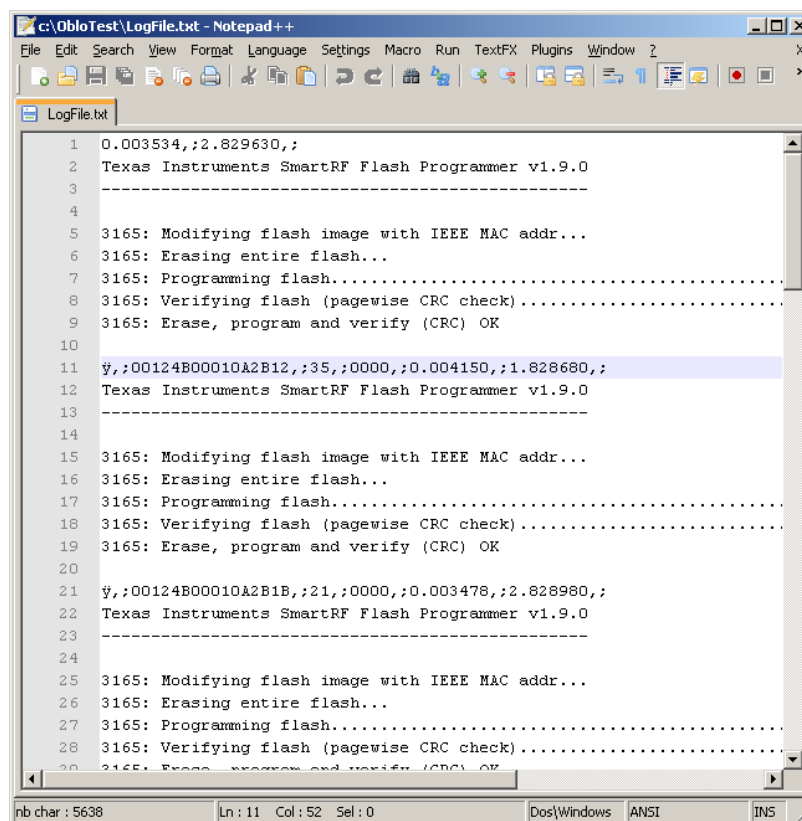
Slika 7.3 Početak ispitivanja – unos bar koda



Slika 7.4 Tok ispitivanja

Po pokretanju ispitivanja prvo je potrebno unijeti bar kod panela pomoću bar kod čitača ili unošenjem putem tastature (**Slika 7.3**). Potom se, u sljedećim koracima automatskog ispitivanja, pokreće podešavanje uređaja za rad. Displej osciloskopa se podešava tako da na ekranu bude jasno vidljiv signal koji je potrebno mjeriti. Izlaz laboratorijskog naponski izvora se podešava na 3 V, koliko je potrebno za napajanje ispitivane jedinice. Potom se uključuje 6 releja koji zatvaraju provodni put od opreme sistema sa jedne strane ka prvoj ispitnoj jedinici na drugoj strani.

Podaci koje prikuplja RT Executor se čuvaju u tekstualnoj datoteci, razdvojeni unaprijed određenim separatorom (**Slika 7.5**). U ovom slučaju su za separator su izabrana dva karaktera ,; da bi se smanjila mogućnost da se u tekstu poruke od nekog od uređaja pojavi isti separator, što bi dovelo do pogrešnog sortiranja podataka u kasnijoj obradi od strane Microsoft Office Excel 2003 alata.

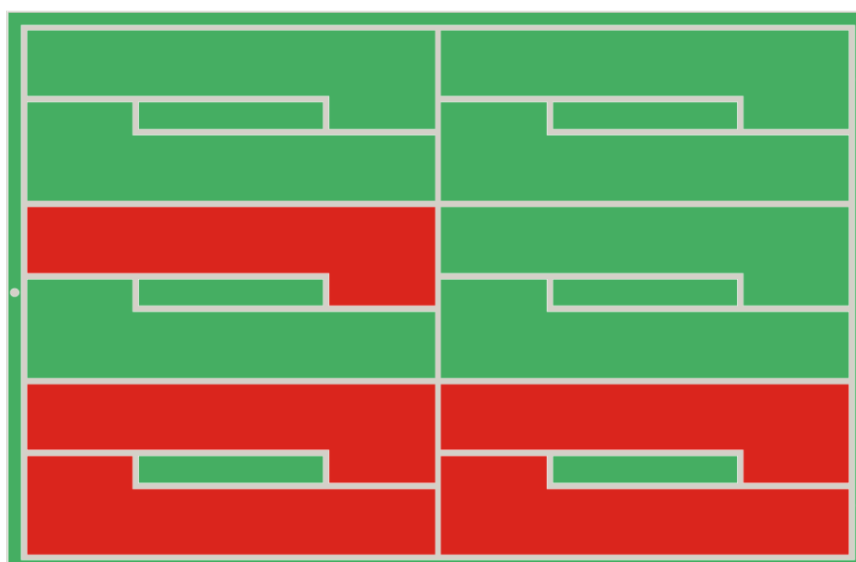


```

1 0.003534,,2.829630,,
2 Texas Instruments SmartRF Flash Programmer v1.9.0
3 -----
4
5 3165: Modifying flash image with IEEE MAC addr...
6 3165: Erasing entire flash...
7 3165: Programming flash.....
8 3165: Verifying flash (pagewise CRC check).....
9 3165: Erase, program and verify (CRC) OK
10
11 0.00124B00010A2B12,,35,,0000,,0.004150,,1.828680,,
12 Texas Instruments SmartRF Flash Programmer v1.9.0
13 -----
14
15 3165: Modifying flash image with IEEE MAC addr...
16 3165: Erasing entire flash...
17 3165: Programming flash.....
18 3165: Verifying flash (pagewise CRC check).....
19 3165: Erase, program and verify (CRC) OK
20
21 0.00124B00010A2B1B,,21,,0000,,0.003478,,2.828980,,
22 Texas Instruments SmartRF Flash Programmer v1.9.0
23 -----
24
25 3165: Modifying flash image with IEEE MAC addr...
26 3165: Erasing entire flash...
27 3165: Programming flash.....
28 3165: Verifying flash (pagewise CRC check).....
29 3165: Erase, program and verify (CRC) OK
30

```

Slika 7.5 Izgled tekstualne datoteke sa “sirovim” podacima ispitivanja



Slika 7.6 Vizuelni prikaz rezultata ispitivanja

Na **Slici 7.6** se vidi vizuelni prikaz koji, na osnovu podataka iz tekstualne datoteke, generiše VBA (Visual Basic for Applications) makro po završenom ispitivanju i na kome su crvenom bojom označene neispravne ispitne jedinice. Pored vizuelnog prikaza za svaki ispitani panel

generišu se i pamte Excel datoteke sa detaljno prikazanim rezultatima ispitivanja, vremenom početka i završetka ispitivanja i datumom. Jedna takva datoteka se vidi na **Slici 7.7**.

No.	I	IV8	Firmware Upload	Address	LinkQ	Data
1	0.004223	1.83024	Erase, program and verify (CRC) OK	00.12.4B.00.01.0A.2B.12	70	0000
2	0.004145	1.82963	Erase, program and verify (CRC) OK	00.12.4B.00.01.0A.2B.1B	6A	0000
3	0.003498	2.82838	Erase, program and verify (CRC) OK	00.12.4B.00.01.1B.85.48	75	0000
4	0.003437	2.83298	Erase, program and verify (CRC) OK	00.12.4B.00.01.12.0D.67	6A	0000
5	0.003783	1.65317	ERROR!			0000
6	0.003416	2.83493	Erase, program and verify (CRC) OK	00.12.4B.00.01.12.14.3F	5C	0000
7	0.003453	2.82722	Erase, program and verify (CRC) OK	00.12.4B.00.01.1B.84.F3		0000
8	0.003544	2.83122	Erase, program and verify (CRC) OK	00.12.4B.00.01.1B.83.A3	70	0000
9	0.009412	1.83343	ERROR!			0000
10	0.007838	1.82606	ERROR!			0000
11	0.004127	1.80813	Erase, program and verify (CRC) OK			0000
12	0.004181	1.8313	Erase, program and verify (CRC) OK			0000
13						0000
14						0000
15						0000
16						0000
17						0000
18						0000
19						0000
20						0000
21						0000

Slika 7.7 Rezultati ispitivanja prikazani u alatu Microsoft Office Excel 2003

Pri masovnom ispitivanju generiše se veliki broj Excel datoteka sa rezultatima ispitivanja. Da bi se olakšalo njihovo pregledanje napravljen je Excel izvještaj koji otvara sve datoteke sa rezultatima ispitivanja iz direktorijuma u kojem su smještene. Zbirni izvještaj u prvoj koloni sadrži brojeve panela, a u narednih dvanaest informaciju o prolaznosti ispitivanja za svaku ispitnu jedinicu sa panela (**Slika 7.8**). U okviru ovog izvještaja moguće je realizovati i dodatnu statistiku koja bi davala informacije o ukupnoj prolaznosti na pojedinačnim ispitima, procentu jedinica palih na ispitima i sl.

PanelNO	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12
000000001	PASSED	PASSED	FAILED	FAILED	PASSED	PASSED	PASSED	PASSED	PASSED	PASSED	PASSED	PASSED
000000003	PASSED	PASSED	PASSED	PASSED	PASSED	FAILED	PASSED	PASSED	FAILED	PASSED	PASSED	PASSED
000000003 (2)	PASSED	FAILED	PASSED	PASSED	PASSED	FAILED	PASSED	PASSED	PASSED	FAILED	PASSED	PASSED
000000007	PASSED	PASSED	PASSED	PASSED	PASSED	PASSED	PASSED	PASSED	PASSED	PASSED	PASSED	FAILED
000000007 (2)	PASSED	PASSED	PASSED	PASSED	PASSED	PASSED	PASSED	PASSED	PASSED	PASSED	PASSED	FAILED
000000073	PASSED	PASSED	PASSED	PASSED	PASSED	PASSED	PASSED	PASSED	PASSED	PASSED	PASSED	PASSED
000000073 (2)	PASSED	FAILED	PASSED	FAILED	PASSED	PASSED	PASSED	PASSED	PASSED	PASSED	PASSED	PASSED
000000081	PASSED	PASSED	PASSED	PASSED	PASSED	FAILED	PASSED	PASSED	PASSED	PASSED	PASSED	PASSED
0000003081	PASSED	PASSED	FAILED	PASSED	PASSED	PASSED	PASSED	PASSED	PASSED	FAILED	PASSED	PASSED
0123456789	PASSED	PASSED	PASSED	PASSED	PASSED	PASSED	PASSED	PASSED	PASSED	PASSED	FAILED	FAILED

Slika 7.8 Zbirni izvještaj

7.1 Rezultati ispitivanja

Ovdje prikazani sistem za automatsko ispitivanje je isproban na panelu sa ispitnim jedinicama na kojima su postojali nedostaci. Sistem je uspio da detektuje sve ispitne jedinice sa nedostacima i da lice koje vrši ispitivanje obavjesti o tom preko jednostavnog vizuelnog prikaza (**Slika 7.6**).

Slika 7.7 prikazuje rezultate ispitivanja korišćenjem alata Microsoft Office Excel 2003. Iz priloženog se vidi da je ispitna sa rednim brojem 5 pala na ispitivanju struje koju vuče iz naponskog izvora. Vrijednost izmjerene struje je ispod donjeg praga. Ovo upućuje na neispravan rad mikrokontrolera TI CC2530 na ispitnoj jedinici. Svi naredni koraci ispitivanja su takođe rezultovali neuspjehom za pomenutu ispitnu jedinicu.

Ispitne jedinice sa rednim brojem 9 i 10 takođe nisu prošle ispitivanje pri čemu kod njih nije uspio unos koda u programsku memoriju. Ovo takođe upućuje na neispravan rad mikrokontrolera TI CC2530, sa nešto drugačijim simptomima (struja koju uređaj vuče je u dozvoljenom opsegu).

Ispitne jedinice sa rednim brojem 11 i 12 su uspješno isprogramirane ali nisu uspjele da pošalju poruku RF primopredajniku. Ovo može da ukaže na neispravnost antene na ispitnim jedinicama ili na neispravnost integrisanog kola Atmel AT42QT2160. Vizuelnim pregledom ispitnih jedinica utvrđeno je da nedostaju komponente koje omogućavaju komunikaciju između TI CC2530 mikrokontrolera i Atmel AT42QT2160 senzorskog integrisanog kola.

8. Zaključak

U ovom radu je prikazano jedno rješenje sistema za automatsko ispitivanje PCB-ova, u ovom slučaju PCB-ova daljinskih upravljača, i programske podrške za ispitivanje kapacitivnih senzora dodira daljinskog upravljača. Razmotrene su moguće metode ispitivanja PCB-ova, detaljno opisana ispitna jedinica sa naglaskom na pojedinosti potrebne za projektovanje sistema za ispitivanje i programske podrške, isprojektovan je sistem za ispitivanje počevši od koncepcije do gotovog rješenja, dato rješenje programske podrške i ukratko ilustrovan tok ispitivanja. Kako je proizvodno ispitivanje tijesno povezano sa cjelokupnim procesom projektovanja uređaja, rad na razvoju sistema zahtijevao je dobru saradnju sa projektnim timom uređaja koji se ispituje. Sistem za ispitivanje je u potpunosti zadovoljio uslove ispitivanja koji su prethodno određeni u saradnji sa projektnim timom ispitne jedinice. Pri automatskom ispitivanju daljinskih upravljača otkrivene su sve proizvodne greške koje su otkrivene i manuelnim ispitivanjem, čime je verifikovana funkcionalnost isprojektovanog sistema.

Što se tiče daljeg razvoja sistema za ispitivanje, predviđena je i njegova adaptacija za ispitivanje dva PCB-a zidnog dimera, uređaja čijim radom upravlja daljinski upravljač čije je ispitivanje opisano u ovom radu. PCB sa modulom za RF komunikaciju ovog uređaja je, iz perspektive ispitivanja, veoma sličan daljinskom upravljaču, tako da neće biti potrebne velike izmjene u sistemu za ispitivanje ovih PCB-ova. Drugi PCB sadrži energetska elektroniku i biće potrebno voditi računa o načinu na koji će se koristiti postojeći sistem za ispitivanje, zato što je predviđeno ispitivanje pod visokim naponom.

Odabrana metoda za ispitivanje kapacitivnih senzora dodira je pokazala u potpunosti zadovoljavajuće rezultate. S druge strane, u ovom radu je prikazana i metoda ispitivanja sa simulacijom dodira pomoću ploče sa elektrodama, i eksperimentalno je pokazano da se može

realizovati i koristiti. Ukoliko u budućnosti bude postojala potreba za njenom upotrebom, biće potrebno izvršiti tek minimalne promjene u programskoj podršci da bi se ova metoda koristila.

9. Literatura

- [1] Stephen F. Scheiber, *Building a Successful Board-Test Strategy*, Butterworth-Heimann, 2001
- [2] Clyde F. Coombs, Jr, *Printed Circuits Handbook*, McGraw Hill, 2008
- [3] Tim Williams, *The Circuit Designer's Companion*, Newnes, 2005
- [4] Atmel, *QMatrix Buttons, Sliders & Wheels*, 16.10.2010,
http://www.atmel.com/products/bsw/qmatrix.asp?family_id=697
- [5] Atmel, *QMatrix™ Technology White Paper*, 16.10.2010,
http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/qmatrix_white_paper_100.pdf
- [6] Atmel, *AT42QT2160 Datasheet*, 16.10.2010,
http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/AT42QT2160_DS.pdf
- [7] Texas Instruments, *CC2530 Datasheet*, 15.12.2010,
<http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/cc2530.pdf>
- [8] Drew Gislason, *Zigbee Wireless Networking*, Newnes, 2008
- [9] CheckSum, *Model TR-5-400-QC Mechanical-Advantage Fixture System Instruction Manual*, 2010, <http://www.checksum.com/PDFs/tr5400man.pdf>
- [10] Agilent Technologies, *Agilent 363XA-Series Programmable DC Power Supplies Datasheet*, 2010,
http://innovate.dreamcatcher.asia/download/Agilent_E363xA_Series_Programmable_DC_Power_Supplies.pdf
- [11] Agilent Technologies, *Agilent 54621A\22A\24A\41A\42A Oscilloscopes and Agilent 54621D\22D\41D\42D Mixed-Signal Oscilloscopes Users Guide*, 2002,
<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/54622-97036.pdf>

-
- [12] Texas instruments, *SmartRF05 Evaluation Board User's Guide*, 2010,
<http://focus.ti.com/lit/ug/swru210a/swru210a.pdf>
 - [13] Texas instruments, *CC2531 USB Hardware User's Guide*, 2010,
<http://focus.ti.com/lit/ug/swru221a/swru221a.pdf>
 - [14] John Green, Stephen Bullen, Rob Bovey, Michael Alexander, *Excel 2007 VBA Programmer's Reference*, Wiley Publishing, Inc., 2007
 - [15] John Walkenbach, *Excel 2003 Power Programming with VBA*, Wiley Publishing, Inc., 2003
 - [16] Wikipedia, *the free encyclopedia*, <http://www.wikipedia.org/>