



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ  
ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА У  
НОВОМ САДУ



Нина Фат

## Капацитивни сензор са веома малом потрошњом

ДИПЛОМСКИ РАД  
- Основне академске студије -

Нови Сад, 2015.



## КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Редни број, РБР:			
Идентификациони број, ИБР:			
Тип документације, ТД:	Монографска документација		
Тип записа, ТЗ:	Текстуални штампани материјал		
Врста рада, ВР:	Завршни (Bachelor) рад		
Аутор, АУ:	Нина Фат		
Ментор, МН:	Иван Мезеи		
Наслов рада, НР:	Капацитивни сензор са веома малом потрошњом		
Језик публикације, ЈП:	Српски / латиница		
Језик извода, ЈИ:	Српски		
Земља публиковања, ЗП:	Република Србија		
Уже географско подручје, УГП:	Војводина		
Година, ГО:	2015		
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)	5/42/14/19/15/0/0		
Научна област, НО:	Електротехника и рачунарство		
Научна дисциплина, НД:	Дигитални микроконтролери		
Предметна одредница/Кључне речи, ПО:	капацитивни сензор, ниска потрошња, САМД20		
УДК			
Чува се, ЧУ:	У библиотеци Факултета техничких наука, Нови Сад		
Важна напомена, ВН:			
Извод, ИЗ:	У овом раду приказане су теоријске основе рада капацитивних сензора, мерење времена одзива, потрошње, као и оптерећености језгра микроконтролера САМД20 повезаног са сензором додира.		
Датум прихватања теме, ДП:			
Датум одbrane, ДО:	30.9.2015		
Чланови комисије, КО:	Председник:	доц. др Иштван Пап	
	Члан:	др Вук Врањковић	Потпис ментора
	Члан, ментор:	доц. др Иван Мезеи	



## KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number, ANO:			
Identification number, INO:			
Document type, DT:	Monographic publication		
Type of record, TR:	Textual printed material		
Contents code, CC:	Bachelor Thesis		
Author, AU:	Nina Fat		
Mentor, MN:	Ivan Mezei		
Title, TI:	Ultra low power capacitive sensor		
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:	2015		
Publisher, PB:	Author's reprint		
Publication place, PP:	Novi Sad, Dositeja Obradovica sq. 6		
Physical description, PD: (chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/applications)	5/42/14/19/15/0/0		
Scientific field, SF:	Electrical Engineering		
Scientific discipline, SD:	Digital Microcontrollers		
Subject/Key words, S/KW:	capacitive sensors, low power, SAMD20		
UC			
Holding data, HD:	The Library of Faculty of Technical Sciences, Novi Sad, Serbia		
Note, N:			
Abstract, AB:	This paper contains theoretical basis of capacitive sensors, as well as measurement of response time, current consumption and CPU load of microcontroller SAMD20 coupled with capacitive sensor.		
Accepted by the Scientific Board on, ASB:			
Defended on, DE:	30.9.2015		
Defended Board, DB:	President:	doc. dr Istvan Pap	
	Member:	dr Vuk Vranjkovic	Mentor's sign
	Member, Mentor:	doc. dr Ivan Mezei	

---

## **Zahvalnica**

*Zahvaljujem se institutu RT-RK na pruženoj podršći za realizaciju ovog rada.*

*Ujedno se zahvaljujem mentoruma dr Ivanu Mezeiju, dr Ištvanu Papu, na datim predlozima i savetima prilikom realizacije rada. Takođe bih se zahvalila stručnom saradniku Aleksandru Živkoviću strpljenju, stručnom i praktičnom znanju, koje je podelio sa mnom.*

*Na kraju, zahvaljujem bratu i majci na strpljenju, moralnoj i materijalnoj podršci tokom studija.*

*Rad posvećujem osobi koja više nije sa mnom, mom ocu, koji mi je prvi pokazao lepote matematike i nauke, i time postavio dobru osnovu, za sve ono što sam postigla do današnjeg dana.*

---

## Sadržaj

Zahvalnica.....	4
Sadržaj.....	5
1. Uvod.....	9
2. Teorijske osnove .....	11
2.1. Opšti princip rada kapacitivnih senzora za dodir.....	11
2.2. Pregled rešenja različitih proizvođača .....	13
2.3. Opis rada Atmel QT2 Xplained Pro.....	14
Dizajn senzora.....	14
Princip rada Qtouch senzora .....	16
3. Opis okruženja .....	20
3.1 Opis Atmel SAM D20 mikrokontrolera sa posebnim akcentom na PTC modul.....	21
Xplained PRO platforma.....	21
PTC modul .....	22
Postizanje niske potrošnje pomoću PTC.....	23
3.2 Opis radnog okruženja 'Atmel Studio 6.2'.....	25
Qtouch biblioteka.....	25
Opis generisanja projekta koji koristi Qtouch biblioteku .....	26
3.3 Opis jednog rešenja Atmel Studio projekta za SAMD20 platformu .....	31
4. Rezultati merenja .....	37
4.1 Merenje aktivnosti procesora .....	37
4.2 Vreme odziva senzora.....	38
4. 3 Potrošnja struje.....	39
5. Zaključak.....	41
LITERATURA .....	42

---

## Skraćenice

AHB/APB – *Atmel Periphetal Bus*, magistrala za podatke koja se koristi za razmenu podataka između glavne aritmetičko logičke jedinice i PTC.

API – *Aplication Programming Interface*, set protokola, rutina i procedura za pravljenje aplikacija

CPU – *Central Processor Unit*, centralna procesorska jedinica koja obavlja sve aritmetičke i logičke operacije, kao i kontrolu PTC i RTC sistema.

DGI – *Data Gateway Iterface*, predstavlja poseban interfejs preko koga Atmelovi mikrokontroleri komuniciraju sa računarcem, koristeći SPI i I2C protokol.

DPI – *Dots Per Inch*, jedinica u kojoj se izražava rezolucija senzora, predstavlja broj tačaka po inču.

I<sup>2</sup>C – *I-squared-C*, multi-master, multi-slave, serijski protokol koji se koristi za komunikaciju sporijih periferija sa bržim mikrokontrolerom.

LED – *Light Emitting Diode*, poluprovodnička komponenta koja ima mogućnost da generiše svetlost, kada se određena vrednost napona pojavi između elektroda.

PTC – *Periphetal Touch Controler*, ugrađeni hardver koji omogućava merenje dodira na senzorima koji funkcionišu kao dugmad, klizači, i točkići

RTC – *Real Time Clock*, je takt koji vodi računa o trenutnom vremenu, kada je glavno napajanje isključeno(najčešće koristi dodatnu bateriju ili superkondenzator).

SWD – *Serial Wire Debug*, standardni ARM bidirekcioni protokol za komunikaciju i debagovanje koji zamenjuje petopinski JTAG protokol.

SPI – *Serial Peripheral Interface*, poseban protokol koji se sastoji od 4 signala. Uglavnom se primenjuje na manja rastojanja u embedded sistemima.

## Spisak slika

<i>Slika 1.</i> Princip merenja međukapacitivnosti i samokapacitivnosti .....	12
<i>Slika 2.</i> Z oblik senzora	
<i>Slika 3.</i> I oblik senzora .....	15
<i>Slika 4.</i> Dijamantska struktura senzora .....	15
<i>Slika 5.</i> Izgled površine senzora X i Y elektroda, i električnog polja spregnutih elektroda senzora .....	16
<i>Slika 6.</i> Povezivanje samokapacitivnog senzora u grupu. ....	17
<i>Slika 7.</i> Povezivanje međukapacitivnog senzora u grupu po x liniji(a) po y liniji (b).....	17
<i>Slika 8.</i> Prikaz signala dual slope konvertora .....	18
<i>Slika 9.</i> Principska šema merenja vrednosti kapacitivnosti kod QMatrix senzora .....	19
<i>Slika 10.</i> Izgled faza grupisanja čvorova prilikom određivanja koordinata dodira .....	20
<i>Slika 11.</i> Izgled pločice ATSAM20J18A.....	21
<i>Slika 12.</i> Opšti princip funkcionisanja QTouch biblioteke, API i PTC modula .....	24
<i>Slika 13.</i> Fajlovi koji se javljaju prilikom kompajliranja biblioteke.....	25
<i>Slika 14.</i> Izgled surface senzora unutar okruženja.....	27
<i>Slika 15.</i> Izgled okruženja sa listom parametara.....	27
<i>Slika 16.</i> Izgled strukture fajlova unutar jednog projekta, kao i moduli koji se koriste .....	31
<i>Slika 17.</i> Prikaz toka merenja i poziva funkcija.....	35
<i>Slika 18.</i> Algoritam za inicijalizaciju dioda, po detekciji dodira .....	36
<i>Slika 19.</i> Merenje vremena odgovora senzora - principska šema dobijeni signali na Agilend Logic Analyzer-u .....	38

---

## Spisak tabela

<i>Tabela 1.</i> Uporedne krakteristike mikrokontrolera sa niskom potrošnjom .....	13
<i>Tabela 2.</i> Izgled zaglavlja(Extension Headera ploče ATSAMD20J18) .....	22
<i>Tabela 3.</i> Poređenje osnovnih parametara na osnovu izgleda elektroda[5].....	23
<i>Tabela 4.</i> Osnovni fajlovi koji se dobijaju prilikom kompajliranja projekta.....	26
<i>Tabela 5.</i> Opšti parametri .....	28
<i>Tabela 6.</i> Parametri specifični za poziciju .....	28
<i>Tabela 7.</i> Parametri za podešavanje.....	28
<i>Tabela 8.</i> Globalni parametri (Global Parameters) za podešavanje .....	29
<i>Tabela 9.</i> Parametri za podešavanje vremena (Timing Parameters).....	29
<i>Tabela 10.</i> Parametri za podešavanje niske potrošnje (Low Power Specific Parameters) .....	29
<i>Tabela 11.</i> Napredni parametri ( Advanced Parameters ).....	30
<i>Tabela 12.</i> Autopodešavanje frekvencije ( Autotune Frequency ) .....	30
<i>Tabela 13.</i> Uporedni prikaz rezultata merenja opterećenja procesora.....	38
<i>Tabela 14.</i> Uporedni prikaz merenja vremena odgovora, i parametara podešenih pri merenju .....	39
<i>Tabela 15.</i> Uporedni prikaz izmerene struje u zavisnosti od parametara .....	40

---

## 1. Uvod

Sve veća potreba potrošača za lakšom i bržom komunikacijom između maštine i čoveka dovela je do toga da polje senzora u fokus današnjih proizvođača. Ova tehnologija upotrebljavana je i ranije za detekciju nivoa tečnosti, vlažnosti i sastava materijala. Međutim tek poslednjih godina doživljavamo veću potražnju i rast proizvodnje kapacitivnih senzora za dodir. Jedan od načina da se olakša upravljanje mašinama je korišćenjem kapacitivnih senzora za dodir, umesto tastera i prekidača. Pre kapacitivnih senzora kontrola računara bila je ostvarena isključivo pomoću tastera, džojstika, i prekidača, međutim zbog mnogih manih ovih elemenata, kao što je oštećenje usled suviše jakog pritiska, oštećenja koja nastaju pri prisustvu prljavštine, tečnosti, inženjeri su bili u potrazi za drugim rešenjem kojim bi bilo olakšano upravljanje. Otkrićem kapacitivnih senzora, napredak je postignut do te mere, da potrošači, prostim potezom prsta upravljuju uređajima. Osim što je sama robusnost uređaja poboljšana, korišćenje senzora dodira je mnogo intuitivnije, naročito ako se senzori dodira ukombinuju sa displejom. Intuitivnost se ogleda, na primer, u ideji da međusobnim približavanjem ili odaljavanjem prstiju može se uvećati ili smanjiti fotografija, što je prirodnije od ideje klasičnog interfejsa u vidu dugmadi za menjanje veličine slike [1].

Takođe, tačno jedna određena funkcija tastera, zamenjena je sa upravljanjem pomoću prsta, gde svaki potez prsta se može različito procesirati, čime jedna površina dobija višestruku funkciju. Još jedna od prednosti je kontinualna ravna površina kapacitivnog senzora za dodir, koja robusnija na nezgode, tipa izlivanja tečnosti po senzoru. Današnji proizvođači osim na robusnost, stavljuju akcenat na lakše upravljanje kao i na nisku potrošnju. Niska potrošnja, osim uštede na energiji, je imperativ današnjih proizvođača, omogućavajući manje zagrevanje uređaja, čime se uklanja potreba za ugrađivanjem posebnog hlađenja. Prednosti male potrošnje ogledaju se i u upotrebi manje baterije, što rezultira manjim i elegantnijim izgledom uređaja koji koristi elemente sa niskom potrošnjom.

Diplomski rad organizovan je u nekoliko poglavlja na sledeći način:

Drugo poglavlje se sastoji od teorijskih osnova i opšteg opisa rada kapacitivnih senzora, sa akcentom na dizajn Qtouch senzora.

Treće poglavlje predstavlja kratak opis okruženja u kome je realizovan program za kontrolu senzora, kao i opis biblioteke, sa dodatkom opisa PTC modula mikrokontrolera koji predstavlja ključan faktor za ostvarenje niske potrošnje.

---

Četvrto poglavlje prikazuje rezultate merenja potrošnje struje, opterećenosti jezgra mikrokontrolera pri izvršavanju algoritma, kao i merenje vremena odgovora kontrolera.

Peto poglavlje je zaključak vezan za nova rešenja i primenu mikrokontrolera i senzora u budućim merenjima.

---

## 2.Teorijeske osnove

U ovom poglavlju biće objašnjene opšte karakteristike senzora za dodir. Dodatak opštim karakteristikama je i uporedni pregled osobina više mikrokontrolera, koji nude opciju niske potrošnje. Osim opštih karakteristika biće opisane izgled i način rada senzora koji se koristi za testiranje struje kao i princip funkcionisanja međukapacitivnih senzora, na čemu je baziran princip rada senzor QT2.

### 2.1. Opšti princip rada kapacitivnih senzora za dodir

Do sada razvijene su različite tehnologije proizvodnje senzora dodira, kod kojih se elektrode prave od provodnih materijala kao što su: bakar, ugljenik, srebro, indium-oksid, dok podloga na kojoj se rade elektrode, mora biti od neprovodnih materijala kao što su polietilen, polistiren, pleksiglas, staklo.

Kapacitivni senzori se sastoje od sloja izolatora koji je pokriven slojem provodnika. Ako se mali napon primeni na ovaj sloj formira se uniformno elektrostatičko polje. Kada provodnik, kao što je ljudski prst, dodiruje površinu koja nije pokrivena provodnikom, kondenzator se formira dinamički. Dinamičko formiranje kondenzatora podrazumeva da kondenzator ne postoji do onog momenta do kada prst, koji je provodnik, ne dodirne dielektričnu površinu ispod koje se nalazi druga elektroda. Položaj prsta može da se određuje u odnosu na uglove, svaki ugao ima različitu efektivnu kapacitivnost [4].

Vrednost kapacitivnosti računa se u zavisnosti od rastojanja između elektroda( $d$ ), permitivnosti vazduha( $\epsilon_0$ ), relativne dielektrične konstante( $\epsilon_r$ ), i površine elektroda( $A$ ). Formula 1.1 prikazuje ovu zavisnost:

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (1.1)$$

Vremenska konstanta punjenja i pražnjenja kondenzatora pomaže nam da odredimo vrednost kapacitivnosti i promenu kapacitivnosti pomoću kontrolera. Struja kao i napon na ulaznim pinovima menjaju se po eksponencijalnom zakonu.

$$\tau = RC \quad (1.2)$$

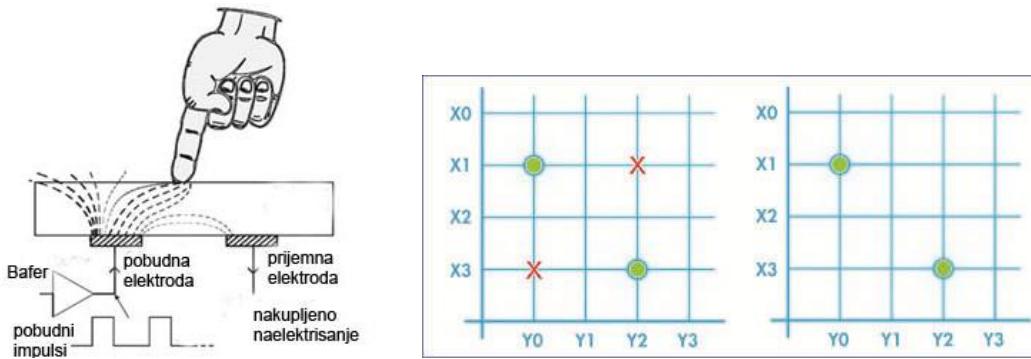
$$V = V_o e^{-t/\tau} \quad (1.3)$$

$$I = \frac{V}{R} e^{-t/\tau} \quad (1.4)$$

Gde je  $\tau$  vremenska konstanta punjenja i pražnjenja kondenzatora,  $V$  trenutni napon,  $V_0$  početni napon na senzoru,  $C$  je kapacitivnost detektovana na senzoru,  $R$  otpornost na senzoru.

Iako je promena kapacitivnosti mala, reda veličine 1-10pF ona se ipak može detektovati pomoću RC vremenske konstante punjenja i pražnjenja kondenzatora.

Merenje kapacitivnosti senzora dodira može se vršiti na više načina. Prvi način je merenjem ukupne kapacitivnosti cele površine. Ovaj način je poznat kao "surface" jer se na 4 ugla ekrana šalju naponski signal i meri se kapacitivnost cele površine. Ako je dodir bliži nekoj od ivica efektna kapacitivnost je veća. Ovaj sistem je zastareo i danas se retko koristi jer je sklon greškama prilikom određivanja pozicije. Drugi sistem je sistem projektovane kapacitivnosti gde postoje kanali na koje se šalju naponski impulsi, i meri efektna kapacitivnost na preseku ovih kanala. Više senzora može biti vezano na jednu I/O liniju kontrolera (koja se još i naziva kanal), tako da svaki senzor je vezan na jedan X kanal (red) i na jednu Y kanal (kolonu).



Slika 1. Princip merenja međukapacitivnosti i samokapacitivnosti

Postoje dva principa rada projektovanih kapacitivnih senzora, na osnovu prenosa nanelektrisanja:

1) oni koji reaguju na međusobnu kapacitivnost, gde objekat koji dodiruje menja kapacitivnost između elektroda kolona i vrsta. Ovde se najčešće postavljaju dve elektrode prijemna i pobudna, koje su vezane na ulazno-izlazne linije mikrokontrolera.

2) oni koji su mere samokapacitivnost, gde objekat koji dodiruje senzor (prst, olovka) prouzrokuje malu struju ili povećava parazitnu kapacitivnost elektrode ka uzemljenju. Ova vrsta senzora je osetljiva na smetnje, pa treba voditi računa o vođenju linija uzemljenja.

Prednost samokapacitivnih senzora ogleda se u činjenici da su veći i zato daju jači signal i omogućavaju tačnije određivanje pozicije. Međutim zbog efekta poznatog kao „ghosting“ [2], gde se

---

prilikom dodira na dva mesta javlja greška detektovanja pogrešne kolone i vrste mreže senzora (Slika 1), samokapacitivni senzori se ne koriste za merenje kapacitivnosti više od dve dodirne tačke. Međukapacitivni senzori su bolje rešenje ako želimo da detektujemo više tačaka dodira, ali zato je tačnost ovih senzora manja, međutim dovoljno dobra da omogući precizno merenje. Prilikom definisanja algoritma za prepoznavanje dodira treba imati u vidu da u oba slučaja razlika prethodne apsolutne pozicije, u odnosu sadašnju apsolutnu poziciju daje nam informaciju o smeru kretanja objekta.

## 2.2. Pregled rešenja različitih proizvođača

U toku poslednjih godina vidimo usvajanje tehnologija vezanih za senzore dodira, kao osnovnog sistema za upravljanje uređajima. Između brojnih proizvođača Atmel je jedan od onih koji nudi seriju Qtouch senzora. Ova serija primenjuje robusnu detekciju, sa dobrom imunošću na smetnje. Proizvođač je dizajnirao i biblioteku ( Qtouch Library ) koja omogućava upravljanje senzorima za dodir.

Osim ovog rešenja Texas Instruments nudi svoje rešenje u vidu predprogramiranog mikrokontrolera serije MSP430, kao i BoosterPack-a, dodatka za mikrokontroler sa dumetom, senzorom blizine i klizačem. Ovo je čip sa malom potrošnjom sa 10 bitnim AD konvertorom, do 256 kB fleš memorije, kao i podrškom za protokole SPI i I2C [12].

Cypress Semiconductor implementira Cap Sence tehnologiju na PSoC (Programmable Sistem on Chip) sa konfigurablem kanalima, koji mogu da upravljaju i sa analognim i sa digitalnim periferijama. Čipovi ovog proizvođača, kao što je CY8C20434 imaju mogućnost priključivanja, i do trideset i tri kapacitivna dugmeta i šest klizača [13].

Microkontroler	Fleš memorija KB	Broj Pinova	Sleep (nA)	WDT(nA)	RTC(nA)
MSP430	128-256	80/100	100	1700	2600
CY8C20434	8	50	100	2600	
STM8S	32- 128	64	800	9000	
SAMD20	16 - 256	64	3000		

Tabela 1. Uporedne karakteristike mikrokontrolera sa niskom potrošnjom

STMicroelectronics proizvodi S-Touch tehnologiju, za koju je napravio svoju specijalnu porodicu STM8S mikrokontrolera. Ovi kontroleri poseduju mogućnost da pređu u stanje niske potrošnje kao i kontroleri prethodna tri proizvođača [14].

---

Informacije o potrošnji (Tabela 1) uzete su iz specifikacija proizvođača. Osim ovih bitno je i spomenuti i ostale proizvođače kao što su Microchip, Analog Devices, Freescale Semiconductor, koji isto imaju svoj značaj prilikom proizvodnje kontrolera namenjenih za nisku potrošnju.

## 2.3. Opis rada Atmel QT2 Xplained Pro

Poglavlje koje sledi bazira se na karakteristikama senzora QT2 Xplained Pro na kojem je implementiran algoritam za detekciju dodira. Osim dizajna i izgleda senzora, proizvođača Atmel, poglavlje sadrži, opis rada međukapacitivnih senzora tipa QTouch, opis načina udruživanja senzorskih čvorova kao i opis rada senzora na najnižem nivou, nivou senzorskog čvora.

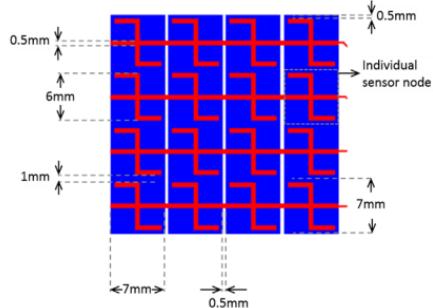
### Dizajn senzora

Dizajn odabranog senzora zasniva se na međusobnoj kapacitivnosti između elektroda. Izgled senzora značajan je za funkcionalnost senzora. Od oblika senzora zavisi linearnost, tačnost, kao i rezolucija. Prilikom dizajna Q-Touch Surface senzora koristila su se tri oblika izrade površinskih elektroda:

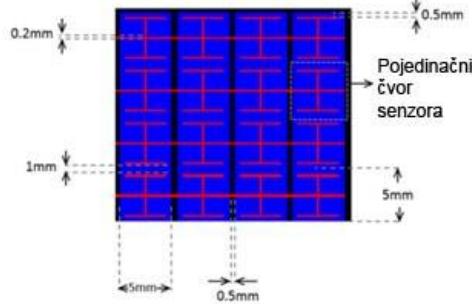
1. "I" oblik
2. "Z" oblik
3. Dijamantski oblik

Prve dve su bazirane na „Flooded - X“ obliku. Ovo znači da se nanelektrisanje distribuira u dve X i Y elektrode na dva sloja substrata. X elektroda potpuno štiti Y elektrodu tako da svaki dodir sa neoseljive strane senzora neće biti detektovan (Slika 2). Da bi postojala prostorna interpolacija, poznata kao sprezanje polja susednih parova elektroda, između elektroda mora postojati mali razmak što se postiže postavljanjem dva sloja supstrata[7].

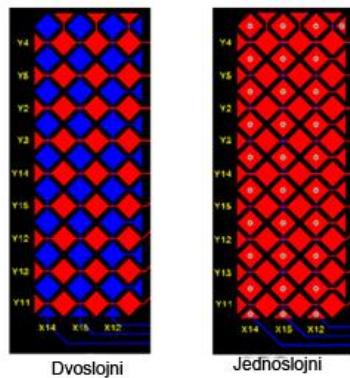
Dijamantska struktura (Slika 4), nema elektrode koje se preklapaju, već par elektroda koje sa nalaze jedne naspram drugih formiraju senzorski čvor. Elektrode su najčešće romboidnog oblika.



Slika 2. Z oblik senzora

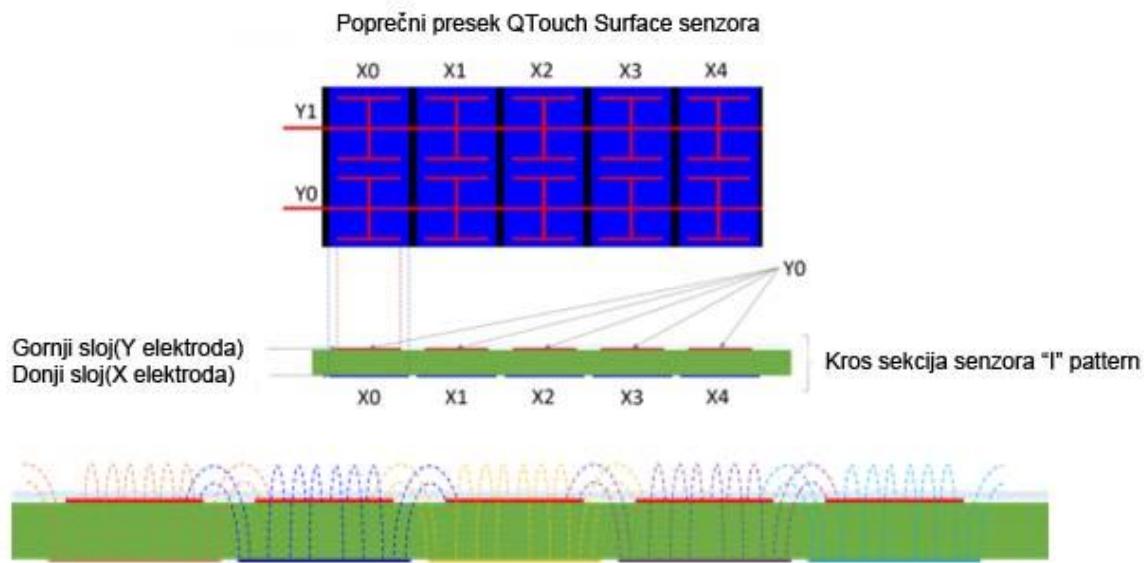


Slika 3. I oblik senzora



Slika 4. Dijamantska struktura senzora

Prilikom dizajna senzora način potrebno je da se vodi računa o tome da se elektrode postavljaju na dva različita sloja supstrata (Slika 5). Različitom bojom prikazane su različite elektrode koje potiču sa različitih nivoa (Y crvene - donji nivo, X plave - gornji nivo). Svaki par elektroda X i Y predstavlja osetljivo područje senzora, koje se još naziva i senzorski čvor.



Slika 5. Izgled površine senzora X i Y elektroda, i elektičnog polja spregnutih elektroda senzora

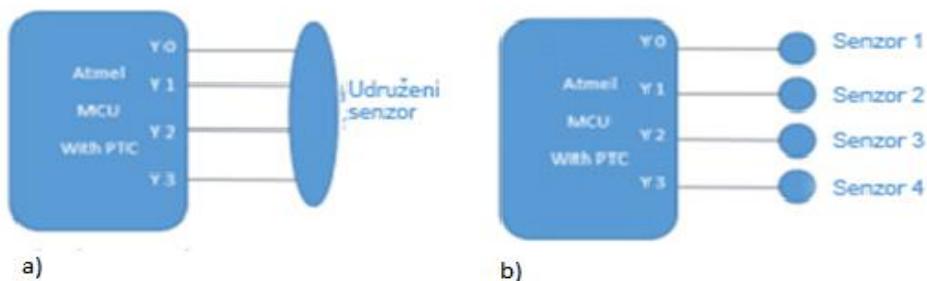
Kada se postavi prst iznad senzorskog čvora on reaguje sa linijama polja i menja se efektivna kapacitivnost spregnutih elektroda. Primeti se da polja susednih senzorskih čvorova se međusobno preklapaju (Slika 5). Ovaj način postavljanja elektroda je poznat kao „prostorna interpolacija“ („Spatial Interpolation“). Posledica je toga što su elektrode donjeg nivoa imaju za nijansu veću površinu od elektroda sa gornjeg nivoa. Dimenzije i razmak između elektroda senzora su takvi da prostorna interpolacija bude optimalna. Ovaj način uređenja obezbeđuje da nema diskontuiteta u detekciji dodira na površini senzora. To znači da kada prevlačimo prst sa jednog para elektroda, ka drugom, postepeno se menja polje, tako da vrednost prvog čvora opada, dok vrednost susednog čvora, ka kojem se kreće prst, postepeno raste.

### Princip rada Qtouch senzora

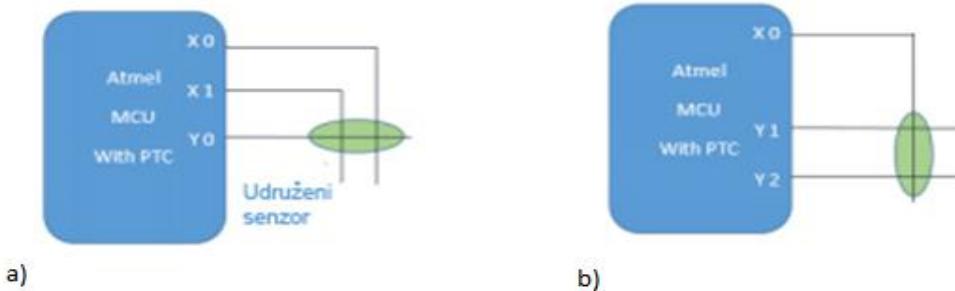
Kapacitivni udruženi senzori predstavljaju princip povezivanja senzorskih čvorova i kontrolera, tako da se akvizicija obavlja istovremeno sa više senzorskih čvorova. To znači da se više linija kontrolera obavlja merenje. Oblasti preseka X i Y linija (ulazno izlaznih linija kontrolera) predstavljaju senzorske čvorove, koji su ranije objašnjeni. Ovakav način implementacije, tj. grupisanjem linija je jedna od osnova za postizanje niske potrošnje. Kada se senzori grupišu, vreme da se odredi položaj prsta je manje, zbog manjeg broja merenja koje se zahtevaju od kontrolera. Na taj način se smanjuje potrošnja i kašnjenje, koje se može javiti između senzora i detekcije dodira. Samostalnim merenjem svakog senzorskog čvora kašnjenje je veliko, jer je potrebno izvršiti više akvizicija. Udruživanje senzorskih čvorova može da se radi i kod samokapacitivnih gde se senzorski čvorovi udružuje u grupu željene veličine (Slika 6). Kod međukapacitivnih senzora se udruživanje vrši po kolonama i vrstama (Slika 7).

Dobar primer je površina koja se sastoji od 64 čvora, i koja može da bude podeljena na 8 udruženih grupa sa po 8 senzora. Prvo se mere grupe velike grupe udruženih senzora, iz kojih se dobija kapacitivnost. Nakon određivanja grupe sa najvećim poljem, 8 čvorova se skenira da bi se razrešila precizna pozicija. Samo 16 merenja je potrebno za razliku od tradicionalnih 64 merenja, gde se meri svaki čvor meri zasebno [7].

Prilikom merenja mi ne dobijamo pravu vrednost kapacitivnosti, nego u slučaju Qtouch senzora se određuje promena električnog polja koja se javlja usled kapacitivne sprege između prsta i postojećeg kondenzatora. Razlika između referentne (početne) vrednosti napona i novodobijene vrednosti napona je *touch delta*, i govori nam o tome koja grupa senzora je izložena dodiru (Slika 5).



Slika 6. Povezivanje samokapacitivnog senzora u grupu.



Slika 7. Povezivanje međukapacitivnog senzora u grupu po x liniji(a) po y liniji (b)

Pojednostavljena principska šema (Slika 9) se sastoji od dve elektrode X i Y koje su međusobno spregnute električnim poljem. Predajna elektroda je napajana povorkom signala i spregnuta električnim poljem sa prijemnom elektrodom. Prijemna elektroda normalno skuplja većinu nanelektrisanja iz polja predajne elektrode sa kojom je spregnuta (predajna elektroda). Ovo polje spregnutih elektroda (koje formiraju kondenzator) se smanjuje sa pojavom ljudskog dodira kao posledica činjenice da ljudsko telo odvodi deo nanelektrisanja kao provodnik. Nanelektrisanje koje se javlja na prijemoj elektrodi, se skuplja u sample kondenzator. Sample kondenzator se interno prazni i puni sinhrono sa predajnom elektrodom.

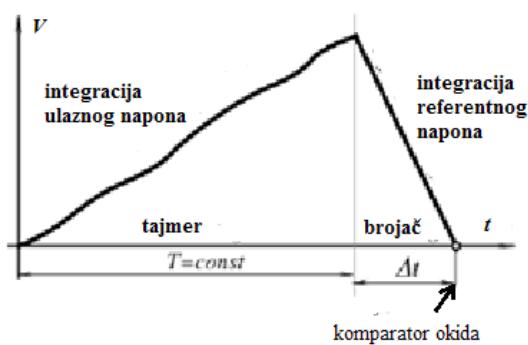
Ovo ujedno poboljšava odnos signala i šuma. Takođe frekvencija signala koji se šalju na predajnu elektrodu utiče i na pojačanje u kolu. Više pulseva koji se šalju na predajnu elektrodu utiče na sakupljanje više nanelektrisanja u sample kondenzatoru, čime je i jači signal. Princip rada ove šeme zasniva se na radu dual slope konvertora. Dual slope konvertor obavlja konvertovanje ulaznog napona  $V_{in}$  (ili napona između elektroda) u funkciju od vremena [3]. U okviru ove komponente nalazi se integrator i komparator praga. Nivo praga je na nultom naponu. Integrator se selektivno povezuje preko prekidača sa referentnim ili ulaznim naponom. Izlaz komparatora šalje signal na kontrolnu logiku, kada izlaz integratora pređe nulu. Kontrolna logika upravlja prekidačem prenos - S1 kao i reset prekidačem S2, koji se koristi za pražnjenje kondenzatora  $C_{in}$  (sample kondenzator). Kada je prekidačem S1 zatvoren integrator je povezan sa ulaznim signalom i tajmer otpočinje brojanje. Tajmer je postavljen na fiksni vremenski interval. U toku ovog vremenskog intervala integrator generiše rastuću ivicu koja se menja prema ulaznom signalu, tako da se sve veće varijacije signala usrednjavaju. Nakon vremenskog intervala  $T$  izlazni napon integratora je:

$$V_{out} = \frac{V_{in} T}{R_{in} C_{in}} \quad (2.1)$$

Tokom faze opadajuće ivice brojač broji impulse takta. Kada komparator detektuje prelazak nule brojač se zaustavlja i kolo se restartuje pražnjenjem kroz prekidač S2. Nanelektrisanje koje se nakupilo u kondenzatoru u toku faze rasta izlaza integratora je direktno srazmerno sa nanelektrisanjem koje se izgubilo u toku faze opadajuće ivice signala.

$$\frac{V_{in} T}{R_{in} C_{in}} = V_{ref} \frac{\Delta t}{R_{in} C_{in}} \quad (2.2)$$

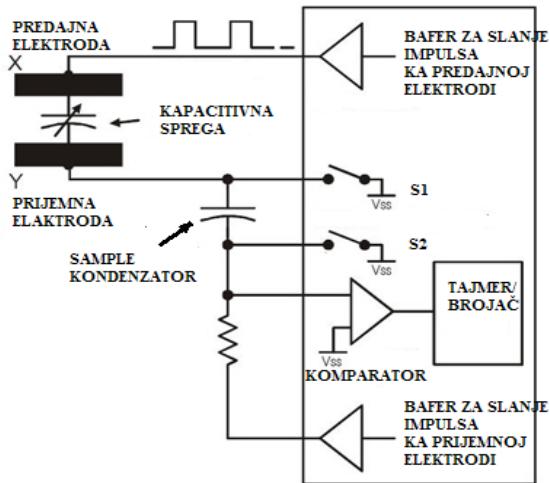
$$\frac{V_{in}}{V_{ref}} = \frac{\Delta t}{T} \quad (2.3)$$



Slika 8. Prikaz signala dual slope konvertora

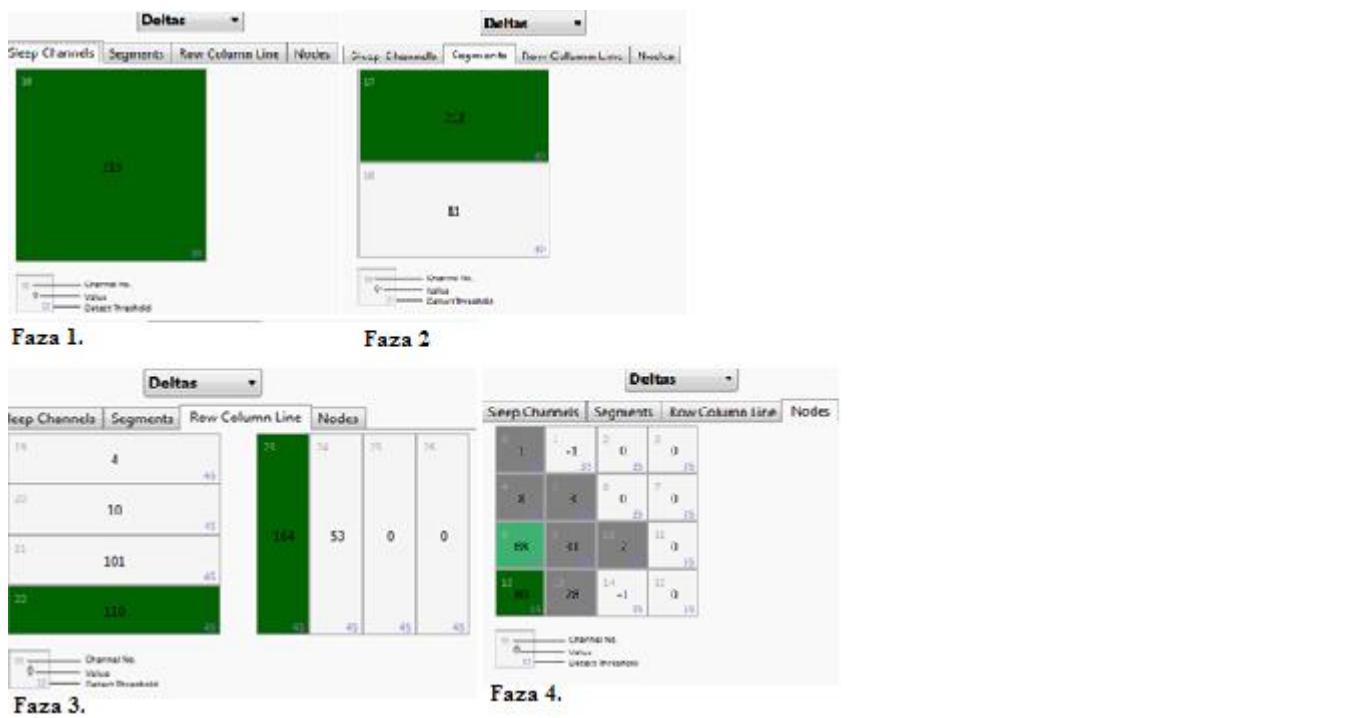
---

Odnos prosečnog ulaznog napona i referentnog napona je direktno zamenjen odnosom dva vremenska intervala.



*Slika 9.* Principska šema merenja vrednosti kapacitivnosti kod QMatrix senzora

Osim dual slope merenja koje se primjenjuje na najnižem nivou logike za merenje polja kod svakog individualnog čvora, za nisku potrošnju bitan je i algoritam za udruživanje senzora prilikom obavljanja akvizicije.



Slika 10. Izgled faza grupisanja čvorova prilikom određivanja koordinata dodira

Prilikom merenja postoje četiri faze (Slika 10): Sleep (Faza 1), Sub-segment (Faza 2), Rows and Columns (Faza 3) , Individual Sensor (Faza 4) [7].

- Faza 1: Počinje grupisanjem kolona i vrsta. Funkcija kojom se definiše veličina grupe poziva se u biblioteci pomocu DEF\_MAX\_LUMP\_SIZE. Faza je dobila ime po velikim udruženim senzorima koji se nazivaju sleep senzori, sa kojih počinju da se vrše merenja tek nakon što se dodirne površina senzora.
- Faza 2: Ako su se u prvoj fazi delili čvorovi horizontalno (na primer na dva velika sleep senzora), u drugoj fazi će se čvorovi deliti po vertikali, i dobićemo dvostruko više sleep senzora sa kojih merimo kapacitivnost.
- Faza 3: Kada se odredi kapacitivnost svakog podsegmenta, podsegment se deli na kolone i vrste, na kojima se vrši očitavanje kapacitivnosti.
- Faza 4: Na kraju se meri kapacitivnost individualnog čvora.

### 3. Opis okruženja

Ovo poglavlje sadrži pregled osnovnih parametara koji se podešavaju prilikom rada senzora unutar Atmel Studio 6.2. Naglasak u ovom poglavlju stavljen je na PTC modul unutar kontrolera koji je

---

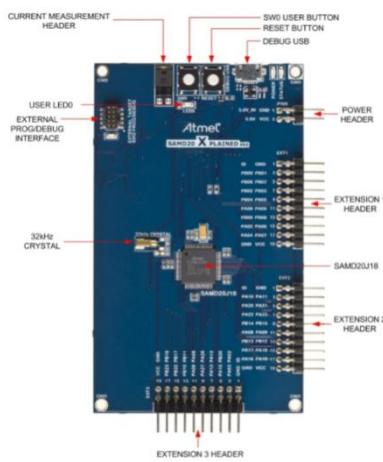
zadužen za postizanje niske potrošnje uvođenjem kontrolera u mirovanje za vreme dok nema događaja koji pristiže sa periferija. Objasnjen je i dat izgled platforme, koja je korišćena.

U nastavku je dato jedno od implementiranih rešenja za platformu XPlained Pro zajedno sa QT2 dodatkom. Opisan je algoritam zajedno sa spiskom osnovnih funkcija koje se koriste u glavnem c fajlu.

### 3.1 Opis Atmel SAM D20 mikrokontrolera sa posebnim akcentom na PTC modul

#### Xplained PRO platforma

Xplained PRO je platforma koja je dizajnirana specijalno za priključivanje Atmel SAM D20 Cortex M0+ mikrokontrolera sa periferijama. Ova platforma omogućava povezivanje dodataka koji se prepoznaju po svom identifikacionom broju (ID). Centar platforme je mikrokontroler ARM serije pod oznakom SAMD20. Programiranje i debagovanje se obavlja se preko programske podrške za kontrolisano izvršenje programa (debuggera) koji je integriran u razvojno okruženje Atmel Studio. Prednosti koje razvojno okruženje poseduje je mogućnost posmatranja izvršavanja programa preko Atmel Embedded Debugger-a (EDBG). Ovaj debugger poseduje on board opservaciju toka izvršenja programa, što znači da nije potrebno da postoji poseban programator za uređaj. EDBG je složen usb uređaj koji se sastoji od 3 dela: debugera, Virtual COM Port-a and Data Gateway Interface (DGI). Koriste se već postojeći protokoli za debagovanje kao što su SWD (Serial Wire Debug) koji je veza između čipa (ATSAM20J18A) i EDBG. Virtuelni COM port je vezan za USB port na ploči i omogućava laku komunikaciju sa uređajem preko terminala [10].



Slika 11. Izgled pločice ATSAM20J18A

XPlained Pro platforma poseduje tri zaglavlja za nastavke čije funkcije su prikazane u *Tabela 2*.

Broj pina	EXT1	EXT2	EXT3	Ime	Opis
1				ID	komunikaciona linija sa čipom na dodatnoj ploči
2				GND	Uzemljenje
3	PB00	PA10	PA02	ADC(+)	Analogno digitalni konvertor pozitivni kraj
4	PB01	PA11	PA03	ADC(-)	Analogno digitalni konvertor negativan kraj
5	PB06	PA20	PB30	GPIO1	Ulazno izlazna linije
6	PB07	PA21	PA15	GPIO2	Ulazno izlazna linije
7	PB02	PA22	PA12	PWM(+)	Širinska modulacija pulsa, pozitivan kraj
8	PB03	PA23	PA13	PWM(-)	Širinska modulacija pulsa, negativan kraj
9	PB04	PB14	PA28	IRQ/GPIO	Zahtev za prekinom rutinom/ Ulazno izlazna linije
10	PB05	PB15	PA27	SPI_SS_B/GPIO	Odabir slave za SPI komunikaciju
11	PA08	PA08	PA08	TWI_SDA	Linija za podatke za two-wire interfejs
12	PA09	PA09	PA09	TWI_SCL	Linija za takt za two-wire interfejs
13	PB09	PB13	PB11	USART_RX	Prijemna linija za USART
14	PB08	PA12	PB10	USART_TX	Predajna linija za USART
15	PA05	PA17	PB17	SPI_SS_A	Odabir slave za SPI
16	PA06	PA18	PB22	SPI_MOSI	Master-out-Slave-In SPI
17	PA04	PA16	PB16	SPI_MISO	Master-in-Slave-Out SPI
18	PA07	PA19	PB23	SPI_SCK	Takt za serijsku komunikaciju
19	GND	GND		GND	Uzemljenje
20	VCC			VCC	Napajanje za dodatnu ploču (4.4V)

Tabela 2. Izgled zaglavlja(Extension Headera ploče ATSAMD20J18)

### PTC modul

PTC modul je nudi mogućnost da pomoći ugrađenog hardvera u kontroler, se vrši komunikacija sa periferijama sa do 15Y i 15X ulazno izlaznih kanala. Preko AHB/APB magistrale vrši se komunikacija sa internim registima mikrokontrolera za: serijsku komunikaciju, tajmer, brojač, dva analogna komparatora, dvanaestobitni analogno digitalni konvertor, digitalno analogni konvertor kao i pristup registirma događaja. Osim ovoga PTC podržava i merenje samokapacitivnosti kao i međusobne kapacitivnosti senzora koji se priključuju na njega. Za merenje samokapacitivnosti potreban je samo jedan pin po Y kanalu, dok za merenje međusobne kapacitivnosti zahteva se još po jedan pin po X kanalu, za svaki čvor senzora [5].

Ovaj modul je sposoban da samostalno obavlja merenja. Kapacitivni senzor je najčešće formiran na PCBu dok se sa PTC modulom povezuje preko ulazno-izlaznih pinova. Elektrode su povezane sa

---

internim analognim integratorom. Naziv za senzore Qmatrix tipa potiče od toga što su senzori organizovani u matrice kolona i vrsta kanala.

Osnovni parametri koji se posmatraju prilikom analize senzora su (*Tabela 3*):

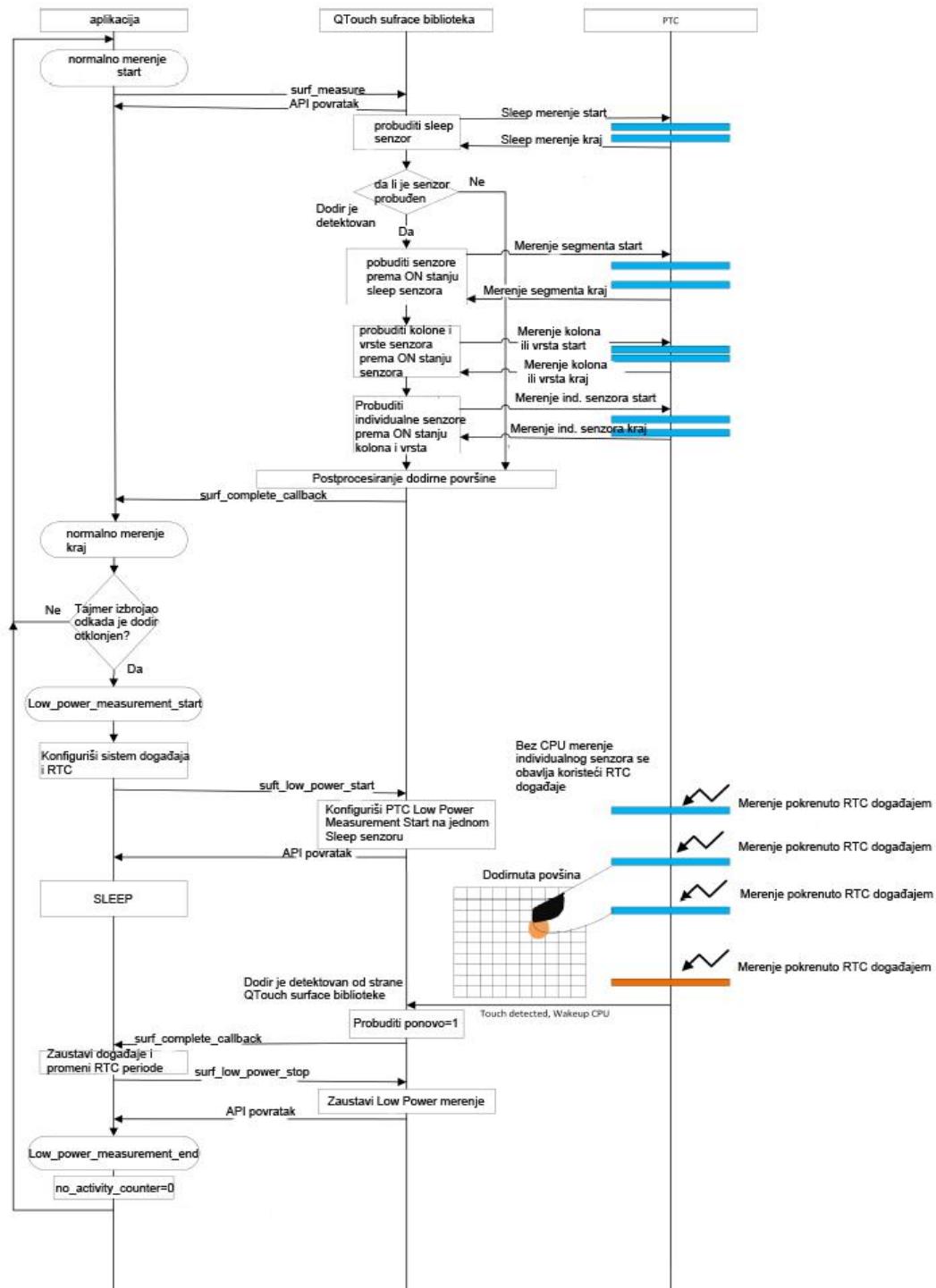
1. Osetljivost – odnosi se na jačinu pritiska dodira za koju se detektuje promena na senzoru. Ona zavisi od geometrije senzora. Senzori se sastoje iz elektroda poređanih u kolone i vrste. Izgled senzora zavisi od rasporeda kolona i vrsta, njihove debljine, što utiče na gustinu i veličinu čvorova.
2. Džiter – predstavlja razliku u merenju između mesta koje je dodirnuto u odnosu na mesto koje je detektovano. U suštini, on predstavlja ukupan šum u sistemu.
3. Preslušavanje – odnosi se na promenu koja je izazvana ako se dodirnu električna polja dva susedna čvora. Samo preslušavanje zavisi od izgleda senzora. Ako su čvorovi gusto postavljeni, jedan blizu drugog, doći će do većeg preslušavanja.
4. Greška linearnosti – devijacija između pozicije koja je detektovana i stvarne pozicije prsta, u slučaju kada prst se kreće po senzoru.
5. Rezolucija – koliko pozicija razlikuje kontroler. Izražava se u DPI promenjivoj.
6. Razlika dodira – minimalno potrebno rastojanje između ivica dva prsta koji dodiruju senzor, da bi se razlikovale kao dve tačke detekcije dodira[5].

	„Z“	„I“	Dijamantska
Ukupna površina	25mm <sup>2</sup>	25mm <sup>2</sup>	25mm <sup>2</sup>
Džiter	0.3mm	0.3mm	1.2mm
Osetljivost	95	100	40
Greška linearnosti	2.6mm	1.6mm	1.3mm
Rezolucija	162 DPI	162 DPI	162 DPI
Razlika dodira	2mm	2mm	2mm

*Tabela 3.* Poređenje osnovnih parametara na osnovu izgleda elektroda[5]

### Postizanje niske potrošnje pomoću PTC

Princip rada, sa udruživanjem senzora, omogućava da sistem može da izvrši manje merenja i oslobađa kontroler od dodatnih računanja. Na ovaj način sistem može da provodi više vremena u stand by (sleep modu). Kontroler i periferije su u sleep modu, u slučaju kada nema detekcije dodira, osim sistema događaja, RTC i PTC modula, koji su aktivni da bi održavali vrednost programskog brojača.



Slika 12. Opšti princip funkcionisanja QTouch biblioteke, API i PTC modula[5]

Dodir korisnika će da izazove kontroler da se probudi i obavi aktivno merenje, da bi razrešio dodir. Da bi se pratila referenca, tj stanje čvorova, RTC je konfigurisan tako da se sa vremena na vreme probudi CPU da obavi jedno merenje (Slika 12). Aplikacija prilikom merenja komunicira sa Qtouch surface bibliotekom i preko nje se kontroler konfiguriše, da spava, u slučaju da nema dodira. Povremeno se preko

---

funcije surf\_measure proverava stanje senzora. Prvo se proveravaju segmenti, pa kolone i vrste i na kraju individualni čvorovi, na osnovu njihovog identifikacionog broja. Nakon završetka ovih merenja surf\_callback funkcija vraća informacije o stanju senzora, i u slučaju da ne postoji dodir, konfiguriše se sistem događaja i RTC, kao i PTC, a kontroler vraća u stanje niske potrošnje.

Kontroler ostaje u stanju niske potrošnje dok god se ne pozove ponovo funkcija surf\_measure(). U slučaju da postoji dodir, ovo će se registrovati događajem koji neće dozvoliti da kontroler ode u stanje niske potrošnje po izvršavanju merenja, nego će se akvizicije vršiti kontinualno dok god se ne registruje da je otklonjen prst sa senzora.

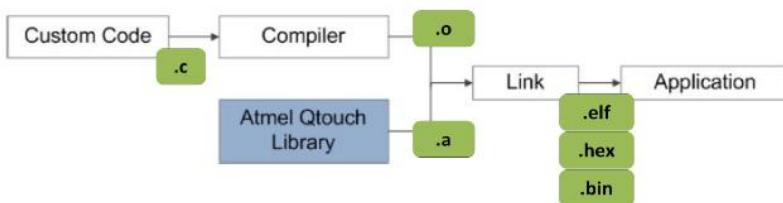
### 3.2 Opis radnog okruženja 'Atmel Studio 6.2'

Poglavlje sadrži opis QTouch biblioteke, načina kompajliranja i pravljenja projekta namenjenog kapacitivnim senzorima unutar Atmel Studio 6.2. Osim ovoga poglavje sadrži spisak parametara koji utiču na rad senzora i koji se kasnije pozivaju unutar programa koji vrši akvizicije.

#### Qtouch biblioteka

Atmel Studio je integrисано okruženje za razvoj (IDE) bazirano na Visual Studio platformi. Sastoji se od kompajlera za C/ C++ namenjenog za razvoj aplikacija za Atmel ARM Cortex-M and Atmel AVR mikrokontolere. Ovo okruženje poseduje debager kao i integriran framework (ASF) sa bibliotekama i primerima namenjenim ovim kontrolerima. Osim ovoga poseduje veliki broj alata namenjenih za grafičko prikazivanje rezultata merenja kao što je QTouch Composer.

Nakon kompajliranja koda biblioteka se prosleđuje linkeru. Izlazni fajlovi su tipa hex, elf, bin (Slika 13).



Slika 13. Fajlovi koji se javljaju prilikom kompajliranja biblioteke

---

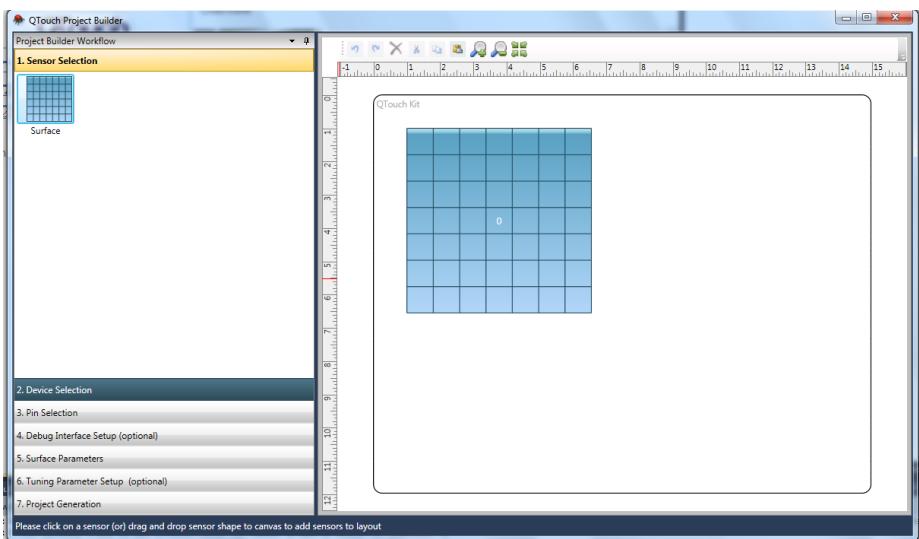
Tabela 4. Osnovni fajlovi koji se dobijaju prilikom kompajliranja projekta

Fajl	Opis
touch_api_SAMD.h	QTouch API zaglavje , koje sadrži strukturu podataka i API koji se koristi za interfejs sa kompjlerom
touch.c	Pomoćni fajl koji se generiše u okviru ProjectBuildera, koji se koristi kao pomoć pri konfiguraciji, i inicijalizaciji QTouch biblioteke
touch.h	Zaglavje pomoćnog fajla koji se koristi pri inicijalizaciji biblioteke
surface.c	Pomoćni fajl koji se generiše u okviru ProjectBuildera, koji se koristi kao pomoć pri konfiguraciji, i inicijalizaciji senzora
surface.h	Zaglavje surface.c
libsamd21_qtouch_iar.a libsamd21_qtouch_gcc.a	QTouch biblioteka za GCC ili IAR kompjeler koja podržava samokapacitivne i međukapacitivne senzore

### Opis generisanja projekta koji koristi Qtouch biblioteku

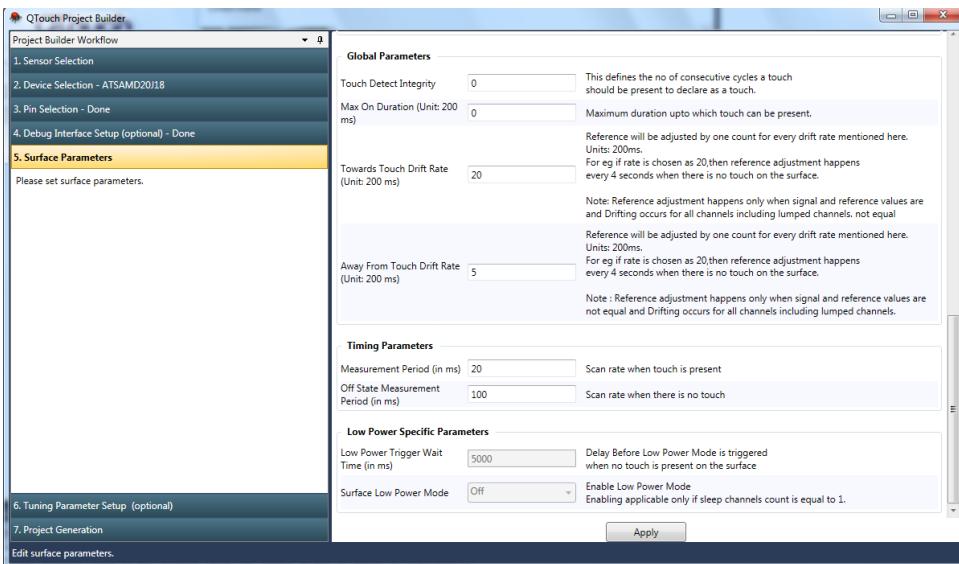
Prilikom generisanja potrebno je da se u opcijama odabere File->New Project->New GCC QTouch Executable Project. Dobija se novi prozor koji poseduje mogućnosti odabira željene biblioteke.

- *Qtouch Library Project*- Koristeći Peripetal Touch, QTouchProject Builder omogućava odabir željenog oblika senzora, od dugmića, preko klizača.
- *Qtouch Safety Library Project* – Sličan koncept kreiranja projekta je i za Safety Library Project osim što se source fajlovi kreiraju podržavajući određene standarde za Home Automaton sisteme
- *Create Qtouch Surface Library Project* – posebna biblioteka koja pomaže da se kreira senzor koji podržava sisteme niske potrošnje koja ima mogućnost detektovanja višestrukog dodira. Osnovna biblioteka za generisanje našeg projekta.
- *Qtouch Library project for non Peripheteal Touch Controler* – biblioteka koju Atmel Studio nudi kao dodatak za senzore dodira koji se kontrolišu sa čipovima koji ne poseduju ugrađeni hardver za nisku potrošnju.



Slika 14. Izgled surface senzora unutar okruženja

Project Builder nudi mogućnosti odabira izgleda senzora. Prilikom otvaranja prozora dobija se izbor liste neophodnih parametara senzora. Prvo je potrebno da se definiše broj čvorova u kolonama i vrstama kao i dimenzije senzora (povlačenjem kursora miša). Nakon odabira izgleda senzora, potrebno je definisati kontroler preko koga se upravlja senzorom. U središnjem delu prozora nalaze se informacije o broju raspoloživih kanala. Za senzore tipa QMatrix, koji se koriste pri merenju, ne postoji mogućnost odabira samokapacitivnosti kao načina merenja kapacitivnosti. Senzori ovog tipa su organizovani kao međukapacitivi senzori.



Slika 15. Izgled okruženja sa listom parametara

Sledeći korak je raspored pinova, koji može automatski da se generiše. Međutim dobra praksa je da se raspored obavlja prema izgledu šeme uređaja (SAMD20 Xplained Pro Headera).

Odabir debug interfejsa je proizvoljan korak koji nam omogućava da pratimo promene na senzoru u toku rada. Vrši se preko kanala za SPI\_SS, SPI\_MISO, SPI\_MOSI koje vezuju za pinove Extension Headera.

Nakon ovog dela odabiraju se parametri površine koji su bitni za merenje osetljivosti senzora (Slika 15). Od ove liste parametara definisće se lista makroa, u fajlu surface.h i touch.h, koji će se prosleđivati funkcijama za podešavanje senzora (koje će kasnije biti objašnjene).

1. Opšti (General)
2. Parametri specifični za poziciju (Position Specific Parameters)
3. Parametri za podešavanje (Tunning Parameters)
4. Globalni parametri (Global Parameters)
5. Parametri za podešavanje vremena (Timing Parameters)
6. Parametri specifični za nisku potrošnju (Low Power Specific Parameters)

Parametar	Opis	Makro(definisan u okviru surface.h)
Lump Node Size	Veličina čvora	DEF_MAX_LUMP_SIZE
Max Num oF Touches Detected	Maksimalan broj dodira koji se može detektovati. Ovaj parametar može imati vrednosti 1 i 2, tj jedan ili dva dodira	DEF_SURF_MAX_TCH

Tabela 5. Opšti parametri

Parametar	Opis	Makro (definisan u okviru surface.h)
DPI X Axis	Broj tačaka po inču na X osi	DEF_SURF_DPI_X
DPI Y Axis	Broj tačala po inču na Y osi	DEF_SURF_DPI_Y
	Veličina površine po X osi(u mm)	DEF_SURF_SIZE_IN_X
	Veličina površine po Y osi(u mm)	DEF_SURF_SIZE_IN_Y

Tabela 6. Parametri specifični za poziciju

Parametar	Opis	Makro (definisan u okviru touch.h)
Sleep channels	Broj sleep kanala	SURF_SLEEP_CHANNELS_DT
Surface segments	Segmenti površine	SURF_SEGMENTS_DT
Surface Row Line	Segmenti reda	SURF_ROW_LINE_DT
Surface Column Line	Segmenti kolona	SURF_SLEEP_CHANNELS_DT
Sufrace Individual Sensors	Zasebni senzor	SURF_IND_SEN_DT

Tabela 7. Parametri za podešavanje

Parametar	Opis	Makro(definisan u okviru surface.h)
Detect Touch Integrity	Detektovanje integriteta senzora	DEF_SURF_DI
Max On Duration	Maksimalno trajanje vremena merenja	DEF_SURF_MAX_ON_DURATION
Towards Duration Drift Rate	Drift rate prema	DEF_SURF_TCH_DRIFT_PERIOD
Away From Touch Drift Rate	Drift od senzora	DEF_SURF_ATCH_DRIFT_PERIOD

Tabela 8. Globalni parametri (Global Parameters) za podešavanje

Parametar	Opis	Makro(definisan u okviru surface.h)
Measurement Period	Period merenja u slučaju detekcije dodira	SURF_ACTIVE_TCH_SCAN_RATE_MS
Off State Measurement	Period merenja u slučaju bez detekcije dodira	SURF_NO_TCH_SCAN_RATE_MS

Tabela 9. Parametri za podešavanje vremena (Timing Parameters)

Parametar	Opis	Makro(definisan u okviru surface.h)
Low Power Trigger Init	Vreme čekanja do aktiviranja	NO_ACTIVITY_TRIGGER_TIME
Surface Low Power Mode	Niska potrošnja za senzor dodira	

Tabela 10. Parametri za podešavanje niske potrošnje (Low Power Specific Parameters)

Dodatne opcije za podešavanje (Tunning Parameter Setup). Ovo podešavanje koristi se u slučaju grešaka koje mogu na nastanu usled starosti uređaja i promene temperature okoline. Postoje dve vrste dodatnih podešavanja za senzore:

1. Osnovni parametri (Basic parameters):

- Red filtera (Filter Level) - koristi se za broj uzoraka koji se koriste da bi se razrešila pozicija. Veći nivo omogućava da se poboljša margina smetnji , ali ovaj postupak produžava vreme merenja kao i potrošnju.
- Automatsko odabiranje (Auto Oversamples) kontroliše automatsko odabiranje senzorskih kanala, kada su signali koji pristižu na senzor nestabilni, i ne mogu se detektovati uobičajenim podešavanjima

2. Napredni parametri (Advanced Parameters):

Parametar	Opis	Makro(definisan u okviru surface.h)
Prescaler	Podešavanje preskalera za clock	DEF_MUTLCAP_CC_CAL_CLK_PRESCALE
Serial Resistor)	Postavljanje serijskog otpornika koji se vezuje interna sa Y pinom. Uloga otpornika je da poveća osetljivost senzora. Koristi se da bi se kapacitivni senzor brže praznio.	DEF_MUTLCAP_CC_CAL_SENSE_RESISTOR
Frekveny Acquisition	Podešavanjem frekvencije merenja dobija se više načina merenja: SPREAD, HOP , NONE. SPREAD vrši merenje na frekvenciji određenoj taktom. HOP odabira frekvenciju PTC tako da se između svako merenja insertuje nekoliko ciklusa takta. Koristi se da se izbegnu greške usled šuma, koje mogu da nastanu na trenutnoj frekvenciji merenja.	DEF_MUTLCAP_HOP_FREQS
		FREQ_HOP_SEL_1
		FREQ_HOP_SEL_2
		FREQ_HOP_SEL_3

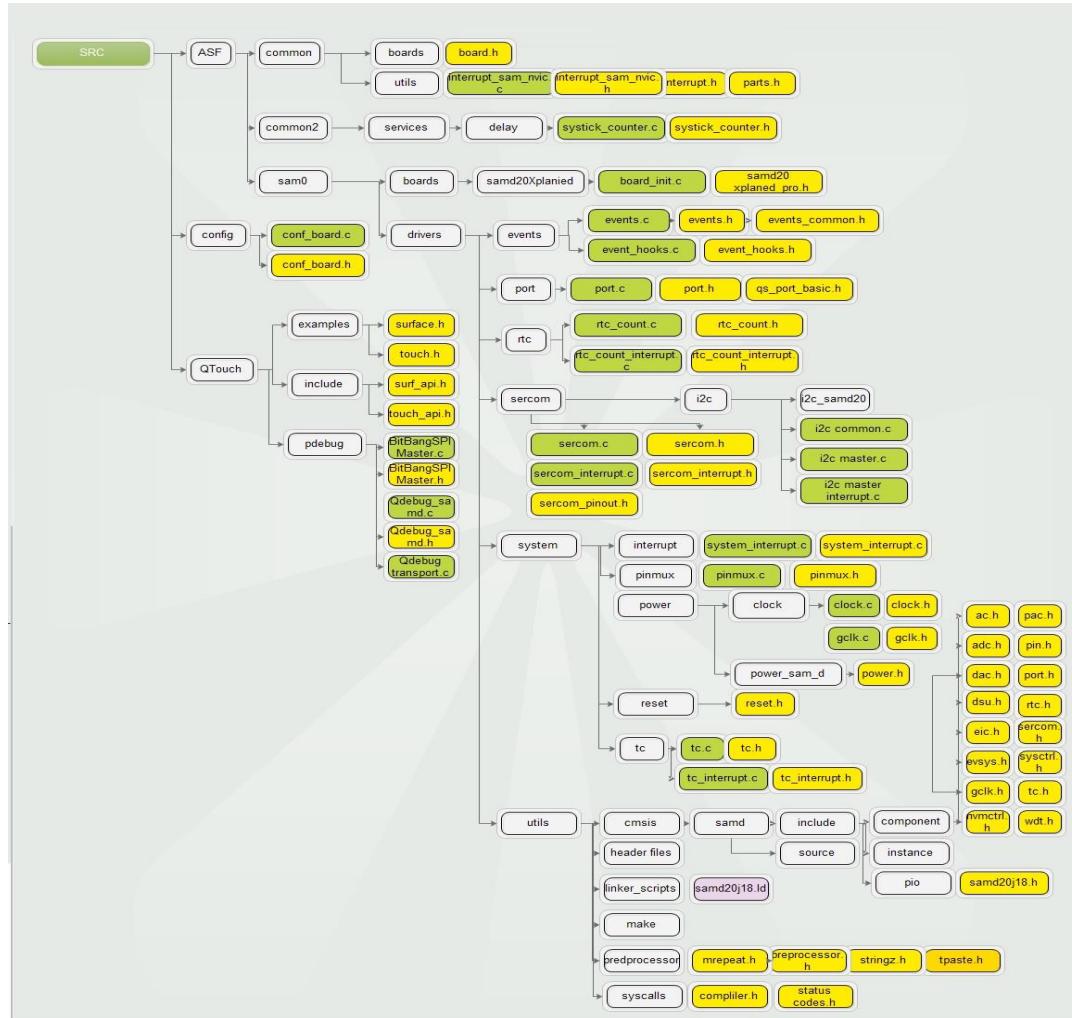
Tabela 11. Napredni parametri ( Advanced Parameters )

Parametar	Opis	Makro definicija
Signal Stability Limit	Promena vrednosti signala posmatra se samo unutar prozora koji je određen vrednošću ovog makroa	DEF_MUTLCAP_FREQ_AUTO_TUNE _SIGNAL_STABILITY_LIMIT
	Broj taktova prilikom podešavanja frekvencije	DEF_MUTLCAP_FREQ_AUTO_TUNE _IN_CNT

Tabela 12. Autopodešavanje frekvencije ( Autotune Frequency )

### 3.3 Opis jednog rešenja Atmel Studio projekta za SAMD20 platformu

Prilikom definisanja novog projekta okruženje samo definiše veliki broj modula (Slika 16). Zbog veličine samog projekta i broja međuzavisnosti između fajlova u ovom radu biće opisane samo funkcije koje su značajne za njegov rad i koje se koriste unutar glavnog C fajla koji sadrži main funkciju.



Slika 16. Izgled strukture fajlova unutar jednog projekta, kao i moduli koji se koriste

Funkcije unutar glavnog projekta:

- `void system_init()`

Funkcija koja inicijalizuje ploču, kao i sistem događaja i ekterni hardver (QT2 ploču). Unutar nje pozivaju se četiri funkcije:

- 
- `system_clock_init()` - funkcija za konfiguriranje takta (clock signala). Dok glavni takt ide do vrednosti 48Mhz, takt periferija i PTC kontrolera koristi interni oscilator vrednosti 8MHz.
  - `system_board_init()` - inicijalizacija ploče (nalaženje ID ploče) i podešavanje ulaznih i izlaznih pinova.
  - `_system_events_init()` - resetovanje modula zaduženog za događaje i konfiguracija linije C na APB magistrali za izveštavanje o događajima.
  - `_system_extint_init()`- konfiguracija eksternog hardvera.

- `delay_init()`

Unutar ove funkcije definišu se funkcije koje se kasnije koriste prilikom generisanja kašnjenja. Osim ovoga podešava se sistemski tajmer unutar SysTick registra. Ovaj 24 bitni registar podržava i ugnježdene vektore prekida.

- `timer_init()`

Konfiguracija RTC ostvaruje se pomoću dve funkcije:

- `configure_rtc_count()`- podešava se broj tajmera (dva 16 bitna ili jedan 32 bitni), kao i povratni poziv koji javlja da je došlo do overflow-a na odabranom kanalu ( kanal 0).
- `configure_rtc_callbacks()` registruje povratni poziv i dozvoljava funkciji da u slučaju nastupanja prekoračenja vrednosti (overflow-a) javi trenutnom program koji se izvršava.

- `surface_configure_ptc_clock()`

Funkcija odabira jedan od generatora takta periferija (u slučaju projekta to je GCLK0 ili generički takt za kanal 0). Ovoj je ujedno i izvor takta za PTC modul, i u slučaju da se ne koristi nijedan od ponuđenih delilaca takta, vrednost je 8Mhz.

- `qts_init_surface()`

Pomoću strukture definisane unutar fajla surface.c podešava se broj kolona i vrsta, drift period, kao vreme do generisanja povratnog poziva. Vrednosti makroa (Tabela 8) se prosleđuju ovoj funkciji i na taj način se inicijalizuje senzor dodira.

---

- **qts\_sensors\_config()**

Funkcija koja kalibriše površinu senzora. Pomoću funkcije `touch_mutlcap_sensor_config()` koja se poziva definiše se tip senzora, njegov prag, histerezis, ime kanala, aks grupa, rezolucija, kao i id senzora.

- **init\_evsys\_config()**

U slučaju da je omogućen režim niske potrošnje postavljanjem makroa `DEF_SURF_LOW_POWER_SENSOR_ENABLE` na 1, ova funkcija koristi već inicijalizovani generički takt za prebacivanje MCU u režim niske potrošnje u trajanju definisanog vremenskog intervala (500ms).

- **qts\_start()**

Kalibriše sve senzore koji su deo dodirne površine

- **configure\_led\_display()**

Konfiguriše I<sup>2</sup>C komunikaciju stavljanjem adrese na magistralu. Preko I<sup>2</sup>C komunikacije se ostvaruje veza sa LED diodama na ploči pomoću čipa IS31FL3728 [11].

Funkcije koje se pozivaju unutar ove funkcije su

- **configure\_i2c\_master()** - Poziva se funkcija za konfiguriranje čipa, zatim se tajmaut postavlja na 0. Na magistralu se šalje definisana adresa mastera. Nakon što se instanca modula kao i paket prosledi čeka se na odgovor, tj javljanje da je operacija uspešno obavljena. Po završetku ovoga čisti se bafer za ledovke i upisuju se novopristigli podaci.
- **write\_to\_led\_display()**-Podaci koji su sačuvani u framebufferu se šalju preko I<sup>2</sup>C magistrale. Prvo se šalju podaci preko `write_buffer-a`. Preko `write_buffer(0)` šalje se registar kolona u koje se upisuje podatak, dok `write_buffer(1)` sadrži podatak, masku koja se prosleđuje toj koloni. Nakon ovoga potrebno je da se osveži eksterni registar na čipu IS31FL3728 koji uključuje LED diode. Ovo se čini slanjem maske 0x0f na adresu 0x0c.
- **clear\_led\_framebuffer()**-prosleđuje svim kolonama i vrstama framebuffera masku 0x00, i na taj način obezbeđuje gašenje dioda.
- **write\_led\_pixel(uint8\_t x, uint8\_t y, bool value)** - Ulazni parametri su x – broj vrste, y – broj kolone, value – vrednost koja se upisuje. Ova funkcija

---

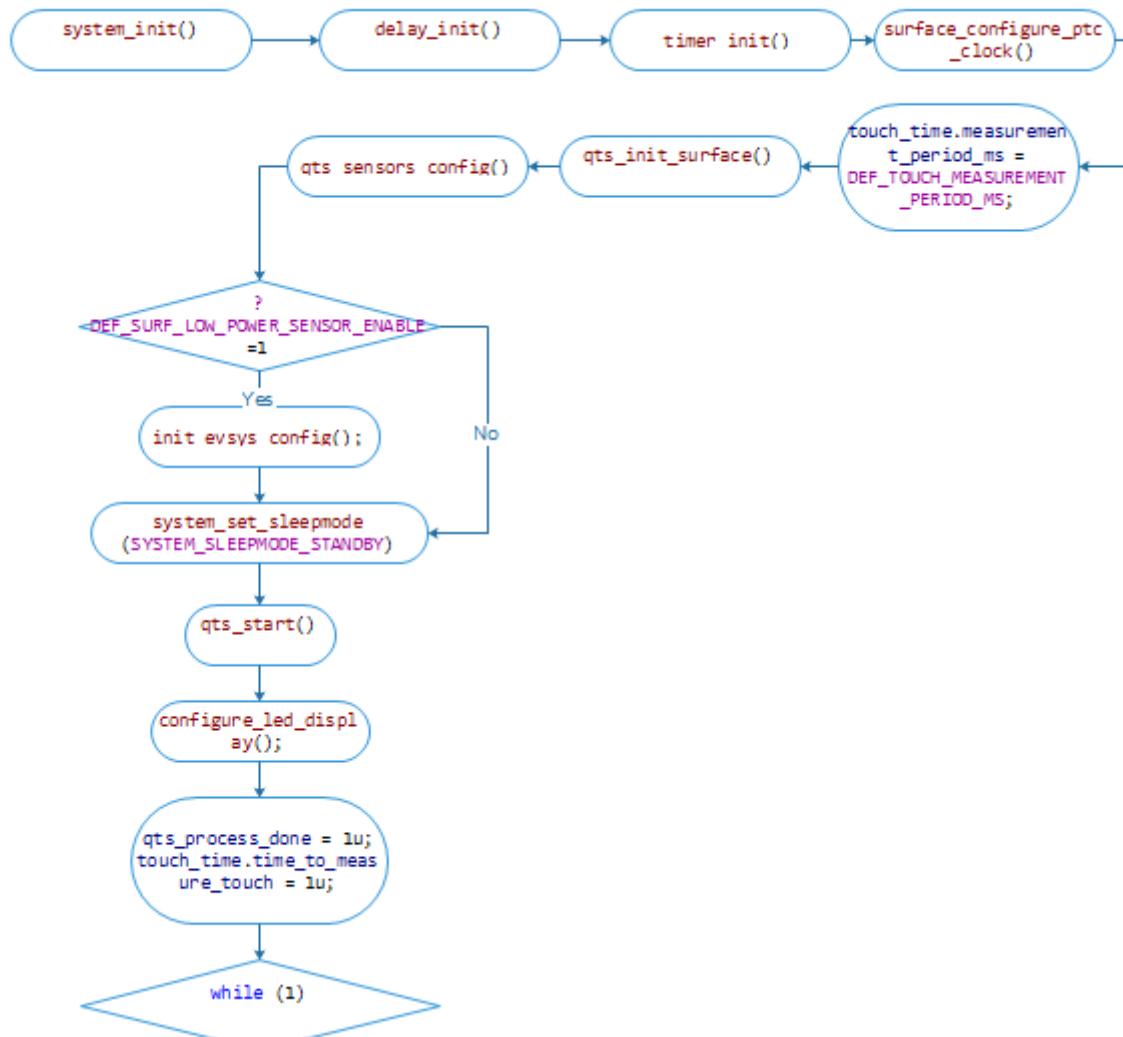
prosleđuje na framebuffer podatke za upis na mesto željene kolone (indeks framebuffera) i vrste (broj mesta za koliko se jedinica šiftuje).

Jedna od značajnijih fajlova je surface.c, koji se automatski generiše prilikom definisanja projekta. Sadrži sve funkcije vezane za kalibraciju i očitavanje senzora.

- **qts\_start()** - Kalibriše senzore i čeka da funkcija surf\_calibrate\_all() vrati vrednost da je uspela u suprotnom program se završava u beskonačnoj petlji
- **qts\_normal\_process()** - Proverava da li je merenje izvršeno proverom qts\_process\_done (vraća 1 u slučaju uspešnog merenja). U slučaju uspešnog merenja podešava se vreme tajmera sa kojom će se porediti vrednost sa RTC koji je povezan sa senzorom. Ova vrednost zavisi od toga da li postoji dodir na površini ili ne. U slučaju da je dodir prisutan vrednost tajmera će morati da bude veća zbog uticaja prsta na elektično polje više čvorova. Ako je kojim slučajem isključeno merenje u niskoj potrošnji onda se prekidi sa PTC dozvoljavaju i vrednost tajmera se odmah poredi sa instancom dobijenom sa RTC, odnosno merenjem kapacitivnosti senzora.
- **qts\_process\_lp()** - Za razliku od normalnog režima merenja, ova vrsta merenja kapacitivnosti poseduje više stanja u kojima se senzor može nalaziti. Zbog zahteva niske potrošnje, merenja se ne obavljuju stalno, nego se povremeno, senzor budi iz stand-by stanja i izvršava merenje. To se izvršava na vremenski interval definisan makroom DEF\_TOUCH\_MEASUREMENT\_PERIOD\_MS. Osim ovoga bilo je potrebno da se reši problem, kada će senzor ponovo da uđe u nisku potrošnju nakon što detektuje dodir. Kapacitivnost čvora se ne vraća odmah na početnu referentnu vrednost nakon otklanjanja dodira. Ovaj problem je rešen uvođenjem međustanja koje se naziva drift i koje ima zadatak da kontroler polako uvede u stanje niske potrošnje smanjujući broj akvizicija koje se obavljuju postepeno. Ovo ujedno i otklanja grešku koja može da nastane u slučaju pomeranja prsta sa jedne pozicije na drugu, kada isto dolazi do smanjenja kapacitivnosti čvora koji se trenutno meri. U ovom slučaju zadatak drift stanja služi da brzo vrati senzor u normalan režim rada.

Glavni deo programa izvršava se u while petlji. Unutar nje poziva se jedna od dve funkcije za aktiviranje moda za nisku potrošnju qts\_process\_lp() ili moda za normalan režim rada qts\_normal\_process() u zavisnosti da li je makro DEF\_SURF\_LOW\_POWER\_SENSOR\_ENABLE postavljen na jedinicu ili nulu. Čeka se na postavljanje promenjive koja signalizira kraj merenja qts\_process\_done na jedinicu da bi se validan podatak prosledio na LED diode. Nakon toga framebuffer, se postavlja na nulu. Framebuffer

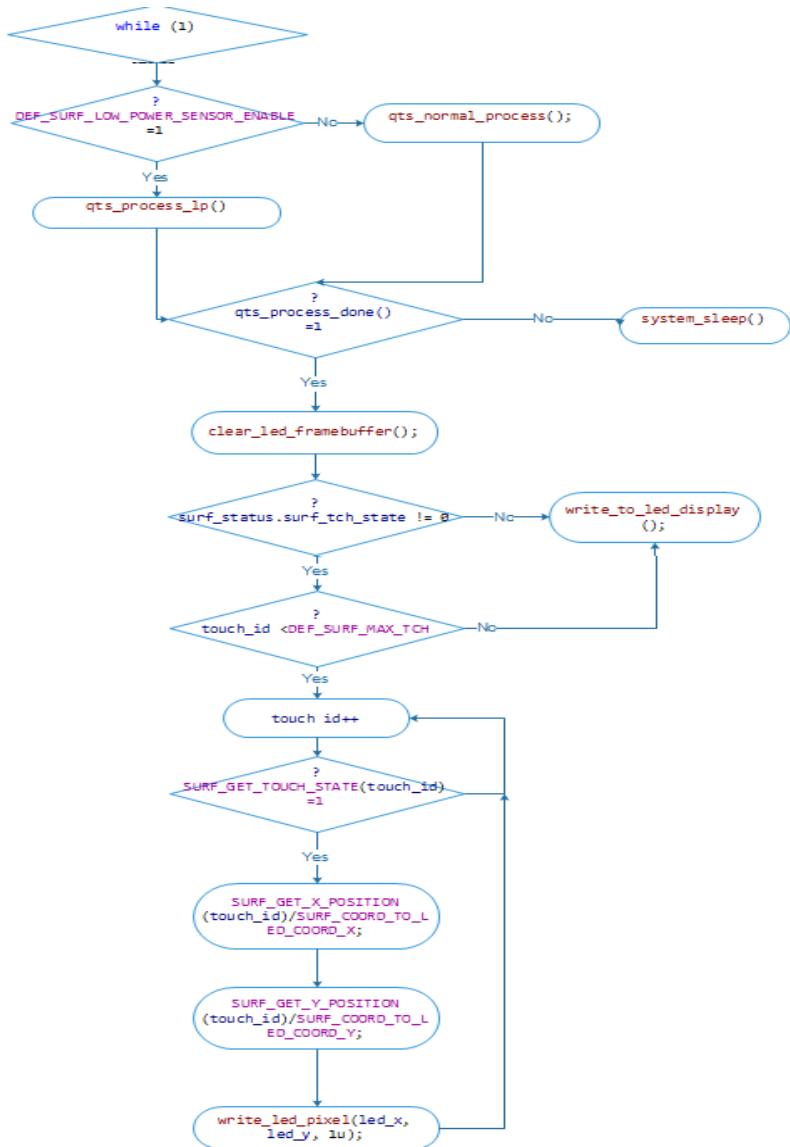
prosleđuje signale u eksterni registar zadužen diode na dodatoj ploči. U slučaju da je detektovan dodir to će se oslikati u vrednosti promenjive `surf_status.surf_tch_state` koja će prijaviti delta vrednost koja se javlja na senzoru. Sledеći korak je provera koliki je dozvoljen broj dodira pomoću `DEF_SURF_MAX_TCH`. Ovo je neophodno u slučaju da se definiše dva dozvoljena dodira i tada se prosleđuju rezultati sa dva senzora na kojima je detektovan prelazak praga tj najveće touch delta. Nakon ovoga proveravaju se svi id brojevi dodeljeni senzorima.



Slika 17. Prikaz toka merenja i poziva funkcija

Id broj se senzoru dodeljuje u okviru udruženog čvora(sleep senzora), senzora kolona i senzora vrsta. Na kraju merenja svoj id dobija i svaki individualni čvor. Nakon što se detektuje prisustvo dodira pomoću funkcije `SURF_GET_TOUCH_STATE` za određeni sensor, potrebno je da se prevedu koordinate senzora u koordinate led matrice. Senzor dodira poseduje samo 4 kolone i vrste, dok se led diode sastoje od 7x7

matrice. Dobija se deljenjem ukupne rezolucije DEF\_TOT\_RES\_X i DEF\_TOT\_RES\_Y sa brojem led kolona i vrsta. Nakon ovoga sledi ispis na LED matricu.



Slika 18. Algoritam za inicijalizaciju dioda, po detekciji dodira

## 4. Rezultati merenja

Osnovni zadatak merenja bila je provera parametara datih od strane proizvođača. Parametri koje je dao proizvođač odnose se na potrošnju struje, vreme odgovora senzora kao i procenat vremena koje kontoler provodi vršeći akvizicije u aktivnom režimu.

Prilikom merenja proizvođač je naveo dva parametra koja se podešavaju u toku merenja.

Prvi parameter je PTC\_CLK\_FREQUENCY koji se odnosi na frekvenciju PTC modula. Frekvencija PTC-a zavisi od dva parametra: od frekvencije generičkog clocka i podešavanja delioca takta (prescalera). Sa povećanjem frekvencije obavlja se više merenja, sa čim kontroler češće ulazi u aktivno stanje i potrošnja je veća.

Drugi parametar predstavlja broj uzoraka da bi se razrešilo merenje, koji se označava kao, FILTER\_LEVEL. Povećanjem ovog parametra povećava se odnos signal smetnja, ali se zato vreme merenja produžava, čime ujedno raste potrošnja [5].

### 4.1 Merenje aktivnosti procesora

Merenje parametara opterećenja procesora (CPU load) obavljen je na taj način što je pre svakog ulaska u sleep stanje jedan GPIO pin podignut na vrednost jedan, a po izlasku iz sleep stanja, pin se spušta na nulu. Za merenje korišćen je Agilend Logic Analyzer, koji je beležio promene vrednosti logičkog nivoa pina. Vremenski interval merenja je bio 1 sekunda, a broj odbiraka signala je bio 131747, što znači da je svakih 8 mikrosekundi vršeno merenje. Jedan od načina na koje je izračunata vrednost CPU load-a je brojanjem uzoraka čija je vrednost bila nula i upoređivanje te vrednosti sa ukupnim brojem odbiraka. Prilikom merenja parametri rada programa bili su podešeni na vrednosti koje je proizvođač naveo, da je koristio prilikom svojih merenja, da bi se postigli što približniji rezultati. Ujedno prilikom merenja isključeno je aktiviranje dioda. U Tabela 13 nalaze se dobijene vrednosti za CPU load date od strane proizvođača kao i one koje su dobijene gore opisanim načinom merenja .

	dimenzije	stanje	broj dodira	Active Scan Rate(ms)	Sleep Scan Rate(ms)	CPU load Atmel	CPU load izmereno	Relativna greška merenja u procentima
<b>PTC_CLK_FREQUENCY = 8MHz, FILTER_LEVEL_16 and Drifting = Disabled</b>								
1	4X * 4Y	sleep	0	20	100	0	0	0
2	4X * 4Y	active	1	20	100	13.36	12.25	8.30
<b>PTC_CLK_FREQUENCY = 8MHz, FILTER_LEVEL_32 and Drifting = Disabled</b>								
3	4X * 4Y	sleep	0	20	100	0	0	0
4	4X * 4Y	active	1	20	100	12.71	12.22	3.80

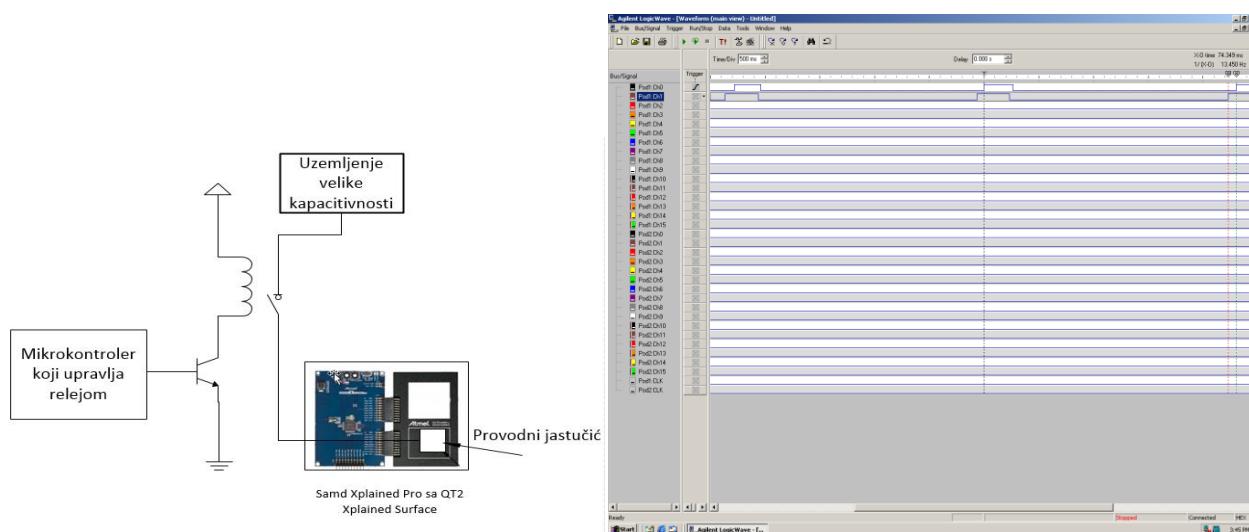
<b>PTC_CLK_FREQUENCY = 4MHz, FILTER_LEVEL_16 and Drifting = Disabled</b>								
5	4X * 4Y	sleep	0	20	100	0	0	0
6	4X * 4Y	active	1	20	100	14.26	12.51	12.27
<b>PTC_CLK_FREQUENCY = 4MHz, FILTER_LEVEL_32 and Drifting = Disabled</b>								
7	4X * 4Y	sleep	0	20	100	0	0	0
8	4X * 4Y	active	1	20	100	7.22	6.24	13.50

Tabela 13. Uporedni prikaz rezultata merenja opterećenja procesora

Sa tabele se može zaključiti da se parametri dobro poklapaju, i da su rezultati ne samo približni nego i bolji nego što je proizvođač specificirao. Ovako dobri rezutati mogu biti i posledica toga što je uklonjen deo algoritma koji se koristio za aktiviranje LED dioda.

#### 4.2 Vreme odziva senzora

Vreme odziva senzora predstavlja vreme koje je potrebno od trenutka kada se dodirne površina do trenutka kada se u algoritmu detektuje dodir. Za ovu vrstu merenja bilo je potrebno razviti posebnu električnu šemu koja će da emulira dodir u određenom vremenskom intervalu i određenog trajanja. Emulacija dodira zasnivala se povezivanjem posebnog provodnog jastičića na masu što predstavlja analogiju sa telom čoveka koje odvodi deo nanelektrisanja prilikom dodira. Drugi mikrokontroler se koristi za aktiviranje releja. U trenutku kada algoritam detektuje dodir, SAMD20 mikrokontroler postavlja pin na jedinicu. Isto tako sa odvajanjem od uzemljenja (emulacija oklanjanja prsta sa senzora) mikrokontroler postavlja isti pin na nulu.



Slika 19. Merenje vremena odgovora senzora - principska šema dobijeni signali na Agilend Logic Analyzer-u

Na slici 19 vide se signali dobijeni na analizatoru. Prva pravougaona povorka dobijena je merena na pinu mikrokontrolera, dok je druga pravougaon povorka (koja se za otprilike 70ms ranije postavlja na jedinicu), je povorka signala dobijena sa ulaza baze tranzistora koji upravlja relejom. Ovde bi se trebala dodati činjenica da relaj unosi kašnjenje od 4.25 ms. Prilikom merenja dobijeni rezultati se dosta razlikuju od onih koji su dobijeni od proizvođača, što se može javiti kao posledica u kašnjenju aktiviranja releja. U tabelama nalaze se rezultati dobijeni od proizvođača(dati u tabelama 7-10, 7-11, 7-12, 7-13 u dokumentu [5]) kao i oni koji su dobijeni u toku merenja.

dimenzije	stanje	broj dodira	Active Scan Rate (ms)	Sleep Scan Rate(ms)	Vreme odgovora Atmel (ms)	Vreme odgovora izmereno (ms)	Relativna greška merenja u procentima
<b>PTC_CLK_FREQUENCY = 8MHz, FILTER_LEVEL_16 and Drifting = Disabled</b>							
4X * 4Y	active	1	20	100	6.86	73.52	971.72
<b>PTC_CLK_FREQUENCY = 8MHz, FILTER_LEVEL_32 and Drifting = Disabled</b>							
4X * 4Y	active	1	20	100	10.15	66.88	547.68
<b>PTC_CLK_FREQUENCY = 4MHz, FILTER_LEVEL_16 and Drifting = Disabled</b>							
4X * 4Y	active	1	20	100	10.57	75.27	712.10
<b>PTC_CLK_FREQUENCY = 4MHz, FILTER_LEVEL_32 and Drifting = Disabled</b>							
4X * 4Y	active	1	20	100	17.47	75.53	329.30

Tabela 14. Uporedni prikaz merenja vremena odgovora, i parametara podešenih pri merenju

#### 4.3 Potrošnja struje

U želji da svojim korisnicima da mogućnost da imaju uvid u potrošnju njihovog sistema, Atmel je u slučaju merenja potrošnje struje napravio specijalan interfejs koji se sastoji od dva pina. Oni idu direktno sa mikrokontrolera i omogućavaju da se lako odredi koliko je trenutno struje mikrokontoler koristi [10]. Rezultati koji su dobijeni merenjem ampermeterom predstavljaju srednje vrednosti stuja. Drifting period (ili period prelaska iz aktivnog u sleep stanje i obratno) je kratak, reda nekoliko ms, i ne može da se detektuje ampermeterom, kao ni period buđenja mikrokontrolera koji je reda 0.1s. Na ovaj način nemoguće je dobiti tačnu vrednost, iako su parametri dobro inicijalizovani. Greška se u ovom slučaju javlja samo u slučaju kada se meri struja drifting perioda mikrokontrolera. U slučaju kada je on u aktivnom režimu rada ili samo u režimu kada je drifting isključen rezultati su dobri. Odstupanja u vrednosti struja u aktivnom periodu rezultat su položaja dodira tj mesta detekcije. Prilikom merenja primećeno je, da se potrošnja smanjuje prilikom približavanja prsta ivicama. Ovo može biti rezultat manjeg broja akvizicija koje se vrše da bi se razrešila pozicija, jer je manje čvorova pod uticajem kapacitivne sprege stvorene prisustvom provodnog tela.

Dimenzija površine	Stanje	Drifring periodicity	Broj dodira	Scan rate	Sleep scan rate	Struja u (uA) Atmel	Struja u (uA) izmereno	Relativna greška u procentima
<b>PTC_CLK_FREQUENCY = 8MHz and FILTER_LEVEL_16</b>								
4X*4Y	sleep	Disabled	0	20	100	2.5	2.9	16
4X*4Y	sleep	2.4	0	20	100	28	89.2	218
4X*4Y	sleep	24	0	20	100	4.8	87.3	1718
4X*4Y	active	N/A	1	20	100	868	936	7.8
<b>PTC_CLK_FREQUENCY = 8MHz and FILTER_LEVEL_32</b>								
4X*4Y	sleep	Disabled	0	20	100	2.6	3.0	15
4X*4Y	sleep	2.4	0	20	100	30	88.4	194
4X*4Y	sleep	24	0	20	100	5	87.5	1650
4X*4Y	active	N/A	1	20	100	937	1113	18
<b>PTC_CLK_FREQUENCY = 4MHz and FILTER_LEVEL_16</b>								
4X*4Y	sleep	Disabled	0	20	100	2.9	3.1	6.8
4X*4Y	sleep	2.4	0	20	100	31	85.2	174
4X*4Y	sleep	24	0	20	100	5.4	87.5	1520
4X*4Y	active	N/A	1	20	100	968	1040	7.4
<b>PTC_CLK_FREQUENCY = 4MHz and FILTER_LEVEL_32</b>								
4X*4Y	sleep	Disabled	0	20	100	3	3	0
4X*4Y	sleep	2.4	0	20	100	33	87.2	164
4X*4Y	sleep	24	0	20	100	5.9	90.5	1433
4X*4Y	active	N/A	1	20	100	584	1240	12.3

Tabela 15. Uporedni prikaz izmerene struje u zavisnosti od parametara

---

## **5. Zaključak**

Osnovni zadatak je bilo obrada teorijskih osnova kapacitivnih senzora, upoznavanjem sa radom QTouch biblioteke, kao i pisanje aplikacije koja će da uključi svetleće diode na dodatnoj QT2 Xplained Surface ploči, svaki put kada senzor detektuje dodir. Osim ovoga zadatak je bio da se provere osnovni parametri dati od strane proizvođača.

Analizom osobina mikrokontrolera primećeno je da senzor malo troši kada se nalazi u stanju niske potrošnje ( $3\mu\text{A}$ ), kao što prozvođač garantuje. Prilikom analize opterećenja jezgra mikrokontrolera, dobijeni rezultati se isto poklapaju sa onim koje je proizvođač dao. Jedini mereni parametar koji se nije poklapao sa rezultatima proizvođača, bio je vreme odziva. Neprekapanja mogu nastati kao posledica primene nove tehnike merenja odziva, pomoću provodnog jastučića koji emulira dodir (vezuje se na masu). Ova tehnika merenja je primenjena, zbog nedovoljno informacija od strane proizvođača o načinu dobijanja navedenih rezultata za vreme odziva.

Dalji tokovi istraživanja mogu se kretati u više pravaca. Jedan od pravaca može biti razvoj bolje tehnike za merenje vremena odziva. Drugi predlog može biti razvoj aplikacije koja će da prepoznaje određene poteze, kao i aplikacije koje će optimalno da koristi resurse, u zavisnosti od toga koji zadatak kontroler treba da obavi.

---

## LITERATURA

- [1] Lei, Philip IS, and Angus KY Wong. "The Multiple-Touch User Interface Revolution." *IT professional* 11.1 (2009): 42-43
- [2] Baxter, "Capacitive Sensors – Design and Applications" , *Wiley-IEEE Press* (1996):137 -138
- [3] Fraden, Jacob. "Handbook of modern sensors.", *Springer* (2004):181-183.
- [4] He, Nannan, and Han-Way Huang. "Experience of Teaching Advanced Touch Sensing Technologies." (2014).
- [5] [http://www.atmel.com/Images/Atmel-42406-QTouch-Surface-Library-Peripheral-Touch-Controller\\_User-Guide.pdf](http://www.atmel.com/Images/Atmel-42406-QTouch-Surface-Library-Peripheral-Touch-Controller_User-Guide.pdf) poslednji put pristupano april 2015
- [6] <http://www.atmel.com/images/qtan0062.pdf> poslednji put pristupano april 2015.
- [7] [http://www.atmel.com/Images/Atmel-42442-QTouch-Surface-Design-Guide\\_ApplicationNote\\_AT11849.pdf](http://www.atmel.com/Images/Atmel-42442-QTouch-Surface-Design-Guide_ApplicationNote_AT11849.pdf) poslednji put pristupano avgust 2015.
- [8] <http://www.embedded.com/design/prototyping-and-development/4008781/Getting-in-touch-with-capacitance-sensor-algorithms> poslednji put pristupano avgust 2015.
- [9] [http://www.atmel.com/images/atmel-42195-qtouch-general-library-peripheral-touch-controller\\_user-guide.pdf](http://www.atmel.com/images/atmel-42195-qtouch-general-library-peripheral-touch-controller_user-guide.pdf) poslednji put pristupano avgust 2015.
- [10] [http://www.atmel.com/Images/Atmel-42102-SAMD20-Xplained-Pro\\_User-Guide.pdf](http://www.atmel.com/Images/Atmel-42102-SAMD20-Xplained-Pro_User-Guide.pdf) poslednji put pristupano avgust 2015.
- [11] <http://www.issi.com/WW/pdf/31FL3728.pdf> poslednji put pristupano septembar 2015.
- [12] <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/msp430g2553.pdf> poslednji put pristupano septembar 2015.
- [13] <http://www.cypress.com/file/37986/download> poslednji put pristupano septembar 2015.
- [14] <http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/datasheet/CD00197787.pdf> poslednji put pristupano septembar 2015.