

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО  
ОБРАЗОВАНИЯ

“Санкт-Петербургский национальный исследовательский  
университет ИТМО”

Факультет информационных технологий и программирования

Проектная работа  
**Емкостной датчик расстояния**

Выполнили студенты группы М3208:

*Насибуллин Данил Наилевич  
Новгородцев Никита Павлович  
Ярощук Владислав Викторович*

Проверил:

*Ефремова Екатерина Александровна*

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

2019

## **ВВЕДЕНИЕ**

Жизнь современного человека неразрывно связана с киберфизическими системами: в каждой из сфер человеческой деятельности присутствуют информационные системы. Для связи цифровой информационной среды и реального мира используются устройства сбора и обработки информации - различные датчики и сенсоры.

**Цель нашей работы** - разработать ёмкостной датчик расстояния. Для достижения данной цели нам потребуется **решить задачи**:

1. Изучить принцип работы емкостных датчиков;
2. Построить теоретическую модель емкостного датчика расстояния;
3. На основе построенной модели собрать экспериментальную установку, демонстрирующую работу модели.

**Методы исследования:** анализ, моделирование, синтез, наблюдение.

## **I. ИЗУЧЕНИЕ ПРИНЦИПА РАБОТЫ ЕМКОСТНЫХ ДАТЧИКОВ**

Емкостным датчиком называют преобразователь параметрического типа, в котором изменение измеряемой величины преобразуется в изменение емкостного сопротивления.

Емкостные датчики линейных перемещений являются наиболее распространенными приборами, широко используемыми в машиностроении и на транспорте, строительстве и энергетике, в различных измерительных комплексах.

Неэлектрические величины, подлежащие измерению и контролю, весьма многочисленны и разнообразны. Значительную их часть составляют линейные перемещения. На основе конденсатора, у которого электрическое поле в рабочем зазоре равномерно, могут быть созданы конструкции емкостных датчиков перемещения двух типов: с переменной площадью электродов и с переменным зазором между электродами.

Проектируемый нами датчик - датчик с переменным зазором между электродами.

## II. ПОСТРОЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДАТЧИКА

Датчик будет реагировать на изменение расстояния руки человека от приемной антенны. За основу датчика расстояния решено было взять RC-цепь (Рис. 1). Зная входное напряжение  $V_{in}$  и сопротивление  $R$ , можно наблюдать различное поведение сигналов на выходе  $V_c$ , изменяя емкость конденсатора  $C$ . Таким образом, использование RC-цепи позволило нам обойтись несколькими макропараметрами.

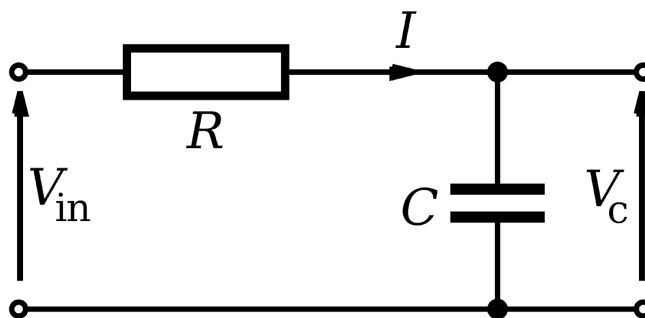


Рис. 1. RC-цепь

Детектирующая ёмкость - сумма ёмкостей: тела человека, проводников, воздушного конденсатора, обкладками которого являются рука человека и приемная антенна. Значения детектирующей ёмкости лежат в диапазоне:

$$C = 10 \dots 100 \text{ пФ}$$

Тогда требуемый порядок сопротивления RC-цепи:

$$R \sim 10 - 100 \text{ МОм}$$

После анализа параметров RC-цепи и возможных компонентов для реализации идеи была построена принципиальная схема датчика (Рис. 2).

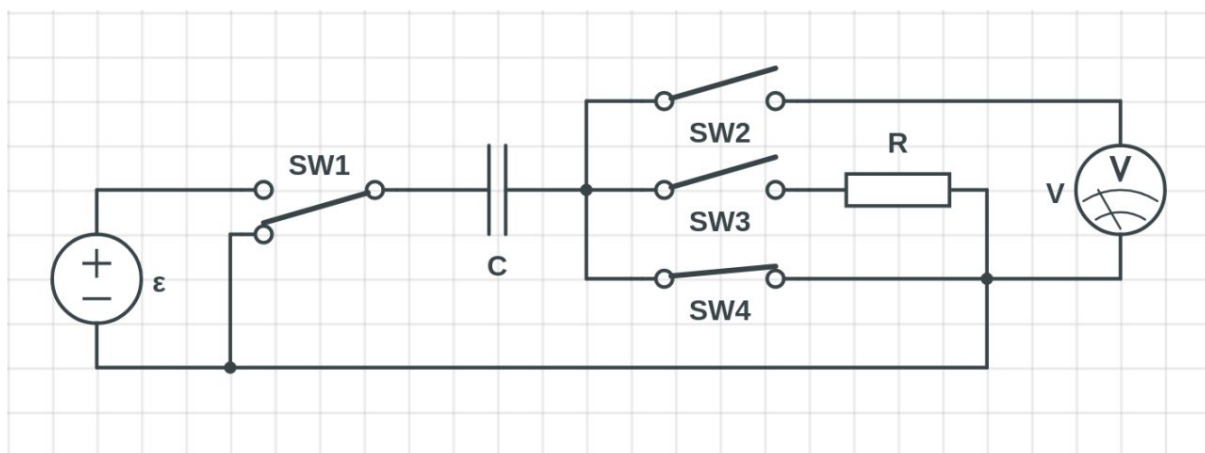


Рис. 2. Модель датчика. Состояние 1 - сброс

Рассмотрим подробно этапы работы модели:

1. Сброс (Рис. 2)

На данном этапе конденсатор разряжен, параметры схемы:

$$t = 0$$

$$I_C = 0$$

$$q_C = 0$$

$$U_C = 0$$

2. Заряд конденсатора (Рис. 3)

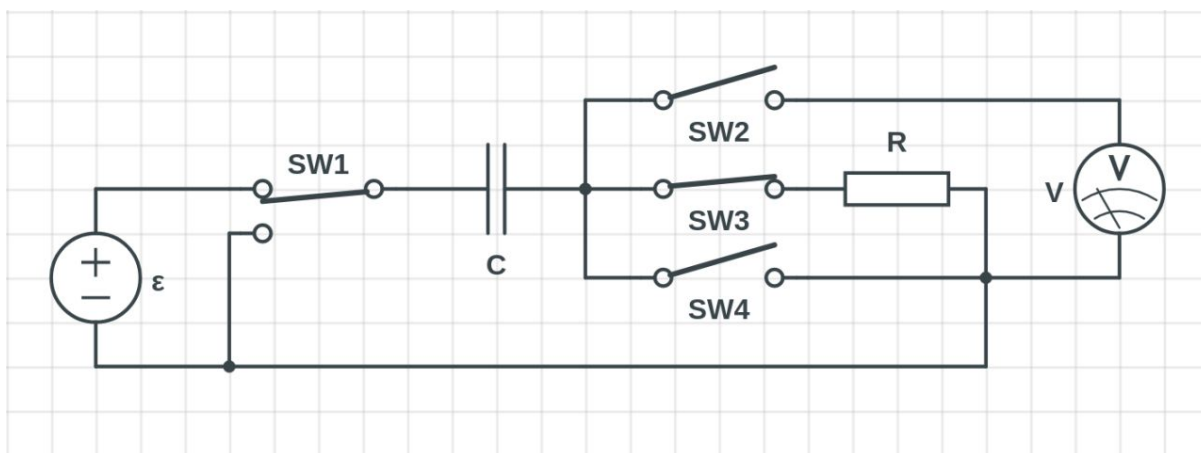


Рис. 3. Модель датчика. Состояние 2 - заряд конденсатора

Происходит заряд конденсатора через резистор R. Параметры зависят от времени:

$$I_C = I_C(t)$$

$$q_C = q_C(t)$$

$$U_C = U_C(t)$$

Установим зависимость  $U_C = U_C(t)$ . Из закона Ома для полной цепи:

$$\varepsilon = U_R + U_C$$

$$U_C = \frac{q(t)}{C}$$

$$U_R = IR$$

$$I = \frac{dq}{dt}$$

$$U_R = R \frac{dq}{dt}$$

$$\varepsilon = \frac{q(t)}{C} + R \frac{dq}{dt}$$

Предельный заряд, который может накопиться в конденсаторе:

$$U_C \rightarrow \varepsilon \text{ при } t \rightarrow \infty$$

$$q_C \rightarrow q_{max} = \varepsilon C \text{ при } t \rightarrow \infty$$

Введем переменную  $q_{diff} = q(t) - q_{max} = q(t) - \varepsilon C$ . Подставим в полученное уравнение, описывающее закон Ома для полной цепи, решим дифференциальное уравнение:

$$\frac{\varepsilon C + q_{diff}}{C} + R \frac{dq}{dt} = \varepsilon$$

$$\frac{q_{diff}}{C} + R \frac{dq}{dt} = 0$$

$$\frac{dq}{q_{diff}} = - \frac{dt}{RC}$$

$$\int \frac{dq}{q_{diff}} = - \frac{1}{RC} \int dt$$

$$\ln(q_{diff}) = - \frac{t}{RC} + \ln(q_{diff0})$$

$q_{diff0}$  - значение  $q_{diff}$  при  $t = 0$

$$q_{diff} = q_{diff0} \exp(- \frac{t}{RC})$$

$$q(t) = C\varepsilon + q_{diff0} \exp(- \frac{t}{RC})$$

$$q(0) = 0$$

$$C\varepsilon + q_{diff0} = 0$$

$$q_{diff0} = - C\varepsilon$$

$$q(t) = C\varepsilon(1 - \exp(- \frac{t}{RC}))$$

$$U_C(t) = \frac{q(t)}{C} = \varepsilon \cdot (1 - \exp(- \frac{t}{RC}))$$

### 3. Измерение параметров (Рис. 4)

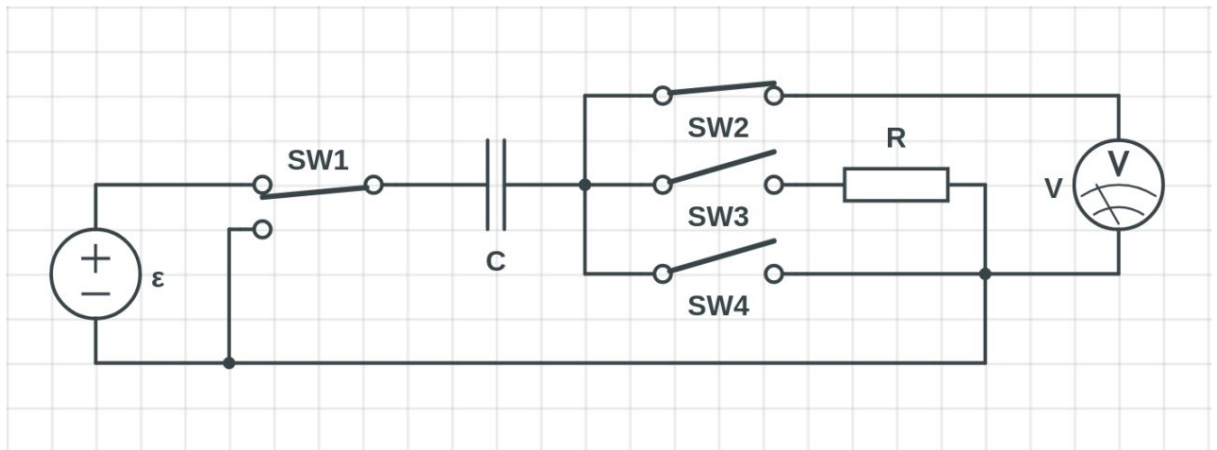


Рис. 4. Модель датчика. Состояние 3 - измерение параметров

Производим быстрое переключение SW3, SW4. Измеряем напряжение  $U_V$ . Зная  $U_C(t)$ , получим  $U_V(t)$ :

$$U_V = \varepsilon - U_C = \varepsilon - \varepsilon \cdot (1 - \exp(- \frac{t}{RC})) = \varepsilon \cdot \exp(- \frac{t}{RC})$$

Оценим поведение  $U_V$  в зависимости от расстояния между обкладками конденсатора  $C$  при остальных постоянных величинах:

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}$$

$$C \sim \frac{1}{d}$$

$$U_V \sim C$$

$$U_V \sim \frac{1}{d}$$

Таким образом, **зафиксировав время измерения**, зная сопротивление R и ЭДС, **можно наблюдать зависимость**

$$U_V \sim \frac{1}{d}$$

где d - расстояние между обкладками конденсатора.

Примеры:

1. Для значений  $\varepsilon = 5\text{В}$ ,  $R = 10\text{МОм}$ ,  $C = 1\text{пФ}$  получим

$$U_V = 0.24\text{В}$$

2. Для значений  $\varepsilon = 5\text{В}$ ,  $R = 10\text{МОм}$ ,  $C = 10\text{пФ}$  получим

$$U_V = 3.7\text{В}$$

3. Для значений  $\varepsilon = 5\text{В}$ ,  $R = 10\text{МОм}$ ,  $C = 10\text{пФ}$  получим

$$U_V = 4.8\text{В}$$

С использованием среды Wolfram Mathematica была построена компьютерная модель (Приложение 3), полностью эквивалентная теоретической. Также, для построенной теоретической модели на платформе C++Qt было разработано приложение-симуляция (Приложение 2), демонстрирующая зависимость значений  $U_V$ ,  $U_C$  от параметров RC-цепи.

### III. СБОРКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

В качестве основы датчика использован микроконтроллер ATtiny85. Принципиальная схема устройства приведена на Рис. 5

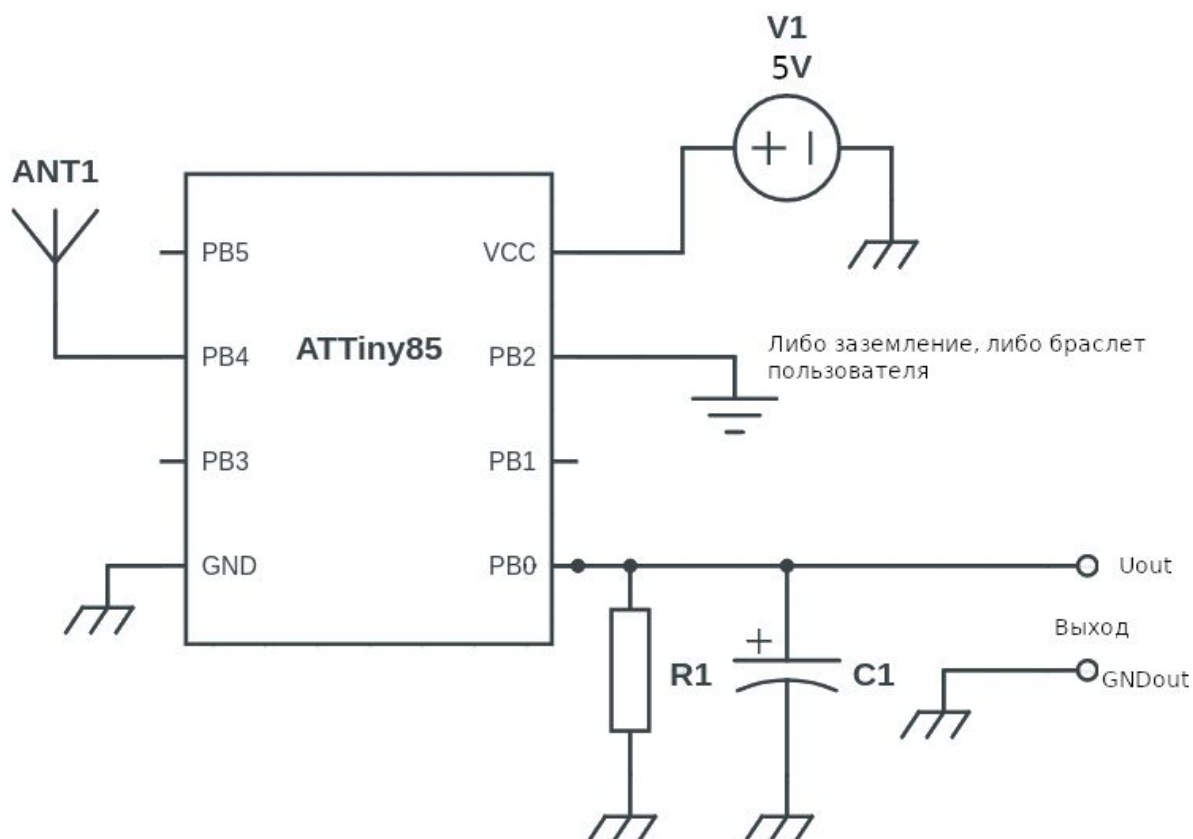


Рис. 5. Принципиальная схема датчика

Используем возможности микроконтроллера: его выводы могут находиться в состоянии высокого уровня (+5В), низкого уровня (+0В, минус питания), в высокоимпедансном состоянии (сопротивление между выводом и остальной схемой порядка 50-100 МОм, из описания микросхемы), а также в режиме подключения АЦП - измерение напряжения, практически эквивалентно высокоимпедансному состоянию). Реализуем модель: емкость конденсатора С представлена емкостью между антенной, подключенной между антенной и рукой человека, резистор R - внутреннее сопротивление микроконтроллера в высокоимпедансном состоянии вывода (50-100 МОм), уровень детектированного сигнала сообщаем пользователю путем изменения заполнения ШИМ-сигнала на выходе PB0, ШИМ-сигнал сглаживается фильтром R1-C1.



Состояние 1 - выходы микроконтроллера PB4, PB2 в состоянии низкого уровня, сброс.

Состояние 2 - выход PB2 в состоянии высокого уровня, PB4 в высокоимпедансном состоянии (эмулируем подключение R).

Состояние 3 - выход PB2 в состоянии высокого уровня, PB4 в режиме работы АЦП (измерение напряжения). На Рис. 6 приведена осциллограмма сигнала на выходе PB2.



Рис. 6 - Осциллограмма выхода PB2

Проводим измерения в цикле, переключаясь между состояниями. На основе напряжения на PB4 генерируем ШИМ-сигнал на выходе PB0, изменяя коэффициент заполнения ШИМ в реальном времени обратно пропорционально считаному с PB4 напряжению (Рис. 7).

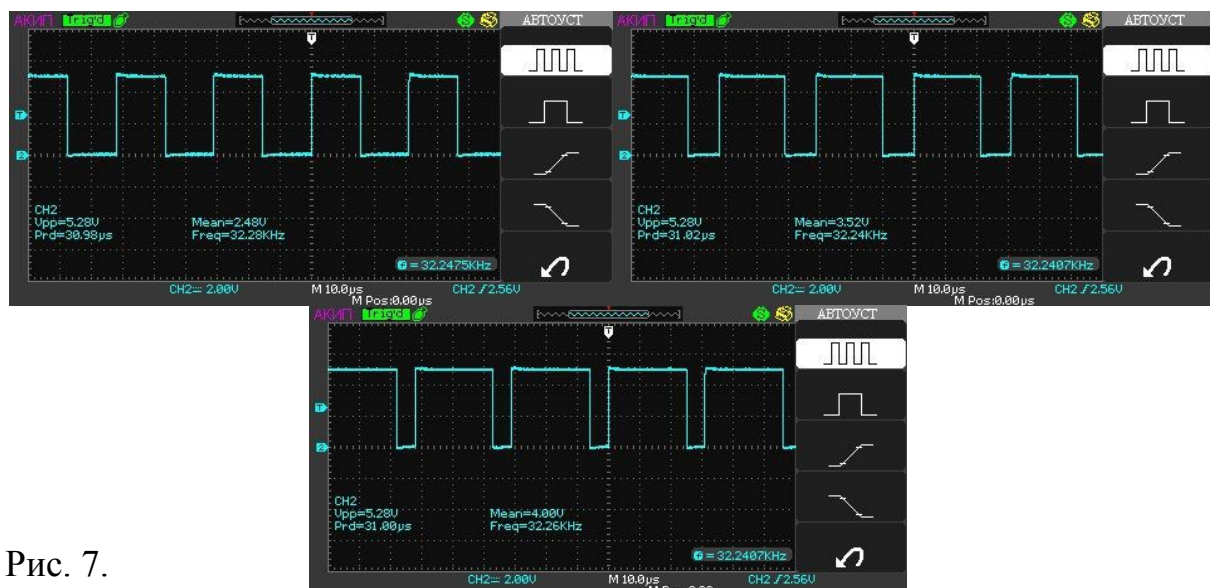
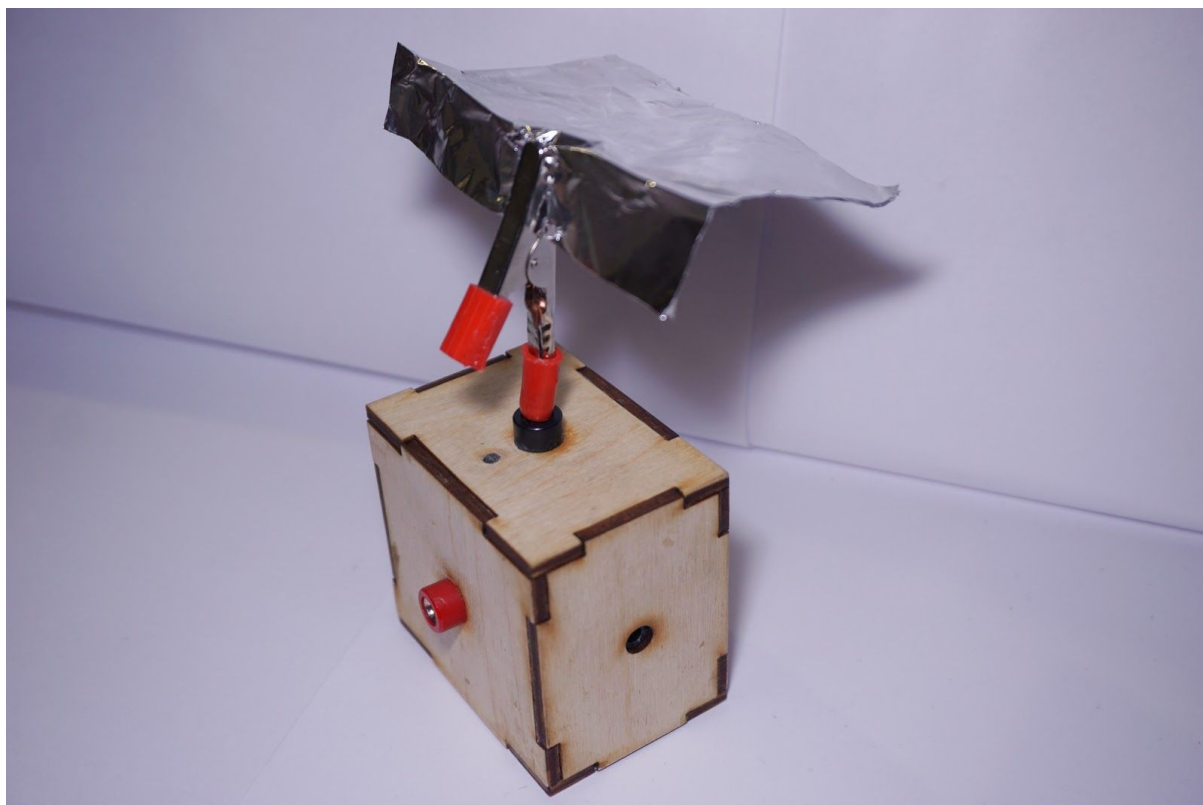


Рис. 7.

Так как в режиме измерения напряжения сопротивление входа микроконтроллера РВ4 относительно схемы снижается до ~100 кОм, время заряда конденсатора было подобрано экспериментально и равно приблизительно 30 мкс.

Разработка производилась на основе подобного проекта [A Tiny Theremin](https://mitxela.com/projects/a_tiny_theremin) автора mixtela ([https://mitxela.com/projects/a\\_tiny\\_theremin](https://mitxela.com/projects/a_tiny_theremin)).

## ВНЕШНИЙ ВИД ГОТОВОГО УСТРОЙСТВА



## **ВЫВОД**

После изучения устройства емкостных датчиков, общего принципа их работы, нами была построена своя теоретическая модель емкостного датчика расстояния. Для проверки работоспособности модели, был успешно построен и протестирован образец датчика на основе разработанной модели. Результат тестирования подтвердил сделанные ранее теоретические предположения, доказал работоспособность модели

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

### Исходный код для микроконтроллера ATtiny85 (AVR Assembler)

```
; Capacity sensor, ATtiny85
; Clock 8mHz
; Antenna - PB4
; Charge electrode - PB2 (connect to the ground ot body)
; PWM output - PB0

.include "tn85def.inc"

.def rMP1 = r16          ; Multi-purpose register 1 = r16
.def rMP2 = r17          ; Multi-purpose register 2 = r17
.def rSUM = r6           ; Register to save sum = r6
.def rCOUNTER = r5       ; Counter register = r5

rjmp init                ; Start from init

; ===== INIT =====
init:
    ; Reset rSUM to 10 == number of readings
    ldi rMP1, 10
    mov rCOUNTER, rMP1
    ; Clear sum register
    clr rSUM

    cli                    ; Disable interrupts
    sbi DDRB, DDB0        ; Set OC0A as output
    sbi DDRB, DDB2        ; Set PB2 as output

    ; Setup Timer 0
    ; Fast PWM mode, output A low at cycle start
    ldi rMP1, (1<<COM0A1)|(1<<COM0A0)|(1<<WGM01)|(1<<WGM00)
    out TCCR0A, rMP1      ; To timer control register A

    ; Set Timer 0 Prescaler = 1
    ldi rMP1, 1<<CS00
    out TCCR0B, rMP1      ; To timer control register B

    ; PWM compare value
    ldi rMP1,0            ; Start from 0% intensity
    out OCR0A,rMP1        ; To compare match register A
    sei                  ; Enable interrupts
```

```

        rjmp loop                ; To main loop

; ===== LOOP =====
loop:
    ; Read antenna capacitance
    ; Calculate average value reading capacitance several times,
    rcall readCap                ; Capacitance value saved to rMP1
    add rSUM, rMP1               ; rSUM += capValue
    brcc repeatReadCap          ; If it does not overflows, go to
repeatReadCap label (repeat reading)
    ; If it overflows, set r6 to 255 (max value)
    clr rSUM
    dec rSUM
    rjmp updatePWM              ; Skip and go to updatePWM label

repeatReadCap:
    dec rCOUNTER                ; r5 is counting down the number of readings
    brne loop                   ; If r5 != 0, go to label loop (+1 reading)
                                ; Else, update PWM value

updatePWM:
    ; Reset rSUM to 10 == number of readings
    ldi rMP1, 10
    mov rCOUNTER, rMP1

    lsr rSUM                    ; Divide sum by two and set volume level
    out OCR0A, r6               ; to compare match register A
    clr rSUM                    ; Clear sum value

rjmp loop                      ; Go to loop begin

; ===== CAPACITANCE READING =====
.equ chargePin = 2
.equ antennaPin = 3
readCap:
    ; Setup ADC:
    ; Vcc as Aref (default)
    ; Left adjust
    ; Read from PB3
    ldi rMP1, (1<<ADLAR|1<<MUX1|1<<MUX0)
    out ADMUX, rMP1

    ; Start reading capacitance

```

```

        cbi PORTB, antennaPin        ; Ground antenna pin

        cbi PORTB, chargePin         ; Ground charge pin
        ldi rMP1, 0b00011111        ; Prepare value for DDRB
        out DDRB, rMP1              ; Set all port as output, load value
        rcall wait                   ; Wait a bit for pin mode changing
        cbi DDRB, antennaPin         ; Set antenna pin as high-impedance
input
        rcall wait                   ; Wait a bit for pin mode changing
        cli                           ; Disable interrupts (timing critical)
        sbi PORTB, chargePin         ; Set charge pin to high
        rcall waitForCharge          ; Wait a specific amount of time
        rcall readADC                ; Start reading

        ret                          ; Return, value saved to rMP1

```

```

; ===== WAIT PROCEDURES =====

```

```

; Simple wait for port mode changing

```

```

wait:

```

```

        ldi rMP2, 10                 ; Set counter value to 10

```

```

waitL:

```

```

        dec rMP2                     ; Decrease counter

```

```

        brne waitL                  ; If counter != 0, go to waitL label

```

```

        ret                          ; Else return

```

```

; Wait for capacitance changing

```

```

waitForCharge:

```

```

        ldi rMP2,8                   ; Counter=8 (obtained by experiments)

```

```

waitForChargeL:

```

```

        nop

```

```

        nop

```

```

        dec rMP2                     ; Decrease counter

```

```

        brne waitForChargeL          ; If counter != 0, goto waitForChargeL label

```

```

        ret                          ; Else return

```

```

; ===== ADC READING =====

```

```

readADC:

```

```

        ; Enable ADC

```

```

        ; Begin conversion cycle

```

```

        ; Clear interrupt flag

```

```

        ; Set division factor to 16

```

```

        ldi rMP1, (1<<ADEN|1<<ADSC|1<<ADIF|1<<ADPS2)

```

```

        out ADCSRA, rMP1
        sei                                ; Enable interrupts
waitForConversion:
        sbis ADCSRA, ADIF                 ; If conversion finished, skip the
next command                             ;
        rjmp waitForConversion           ; goto waitForConversion
        in rMP2, ADCL                     ; Read low ADC byte to rMP2
        in rMP1, ADCH                     ; Read high ADC byte to rMP1
        sbrc rMP2, 7                      ; If low byte >= 128, skip the next command
        inc rMP1                          ; Else increase rMP1 value
        ret                              ; Return, capacitance value saved to rMP1

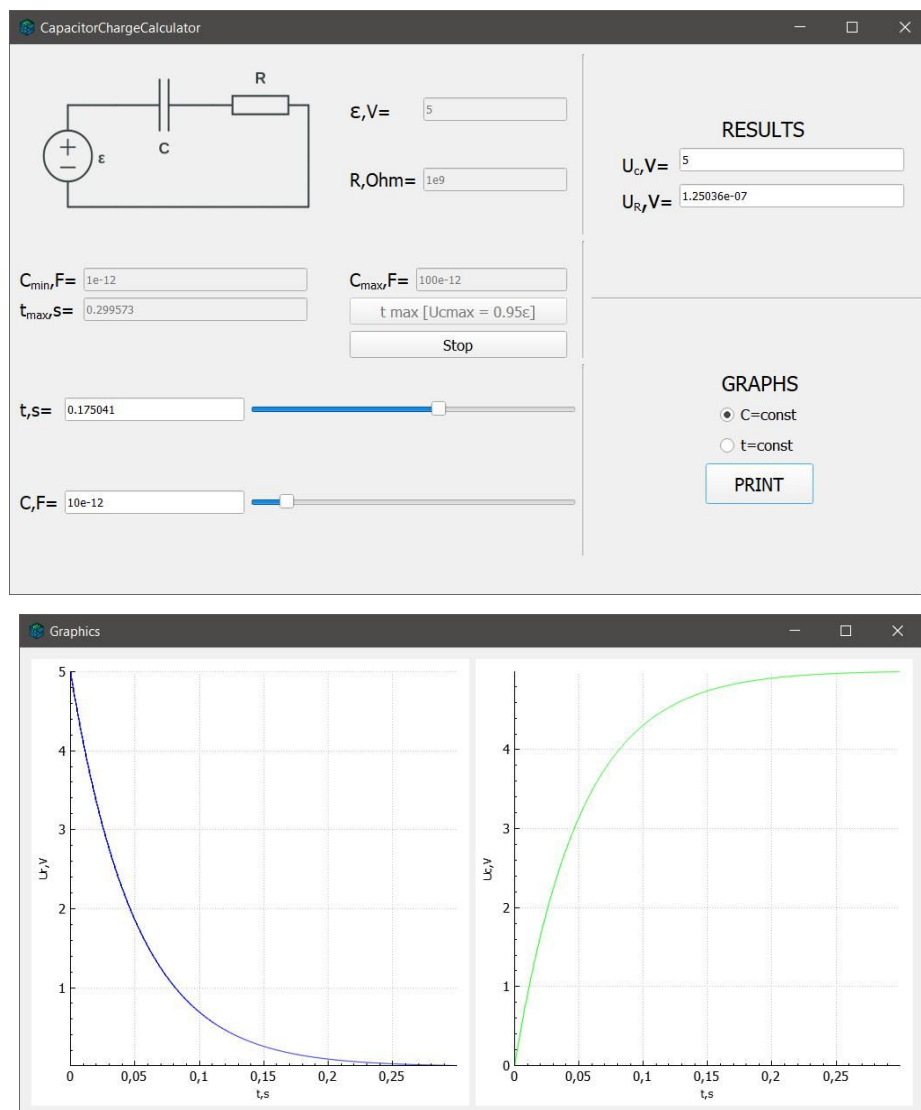
```

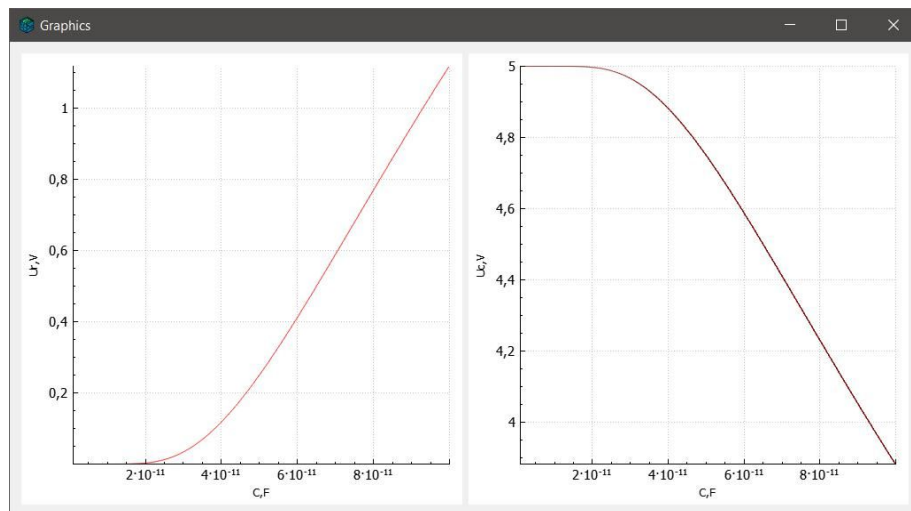


## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Приложение-калькулятор параметров RC-цепи, написано на C++ с использованием фреймворка Qt.

В архиве *CapacitorChargeCalculator.zip* содержится запускаемая версия приложения





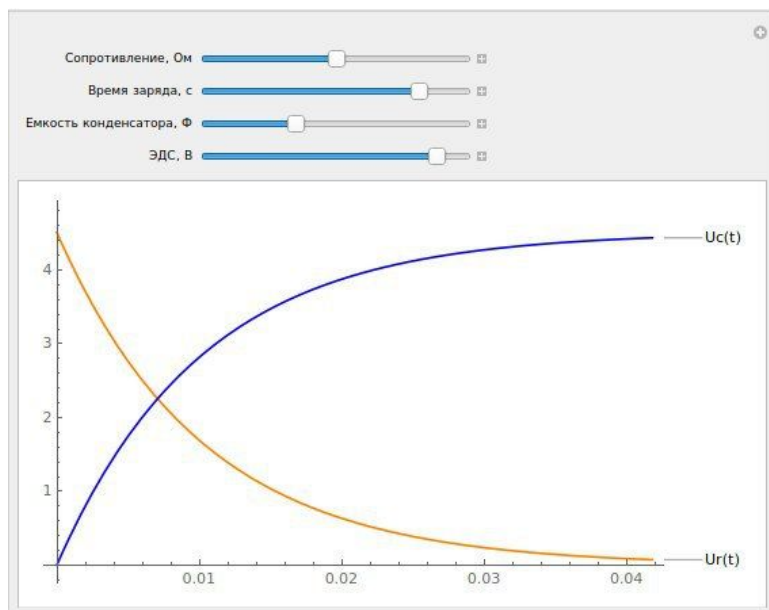
### ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Модели, описывающие параметры RC-цепи. Построены с использованием платформы Wolfram Mathematica.

Подробное описание: *ProximitySensorModel.pdf*

Исходники: *ProximitySensorModel.nb*

*Модель 1, фиксированное время заряда конденсатора, зависимость от времени*



*Модель 2, фиксированное время заряда, зависимость от емкости конденсатора*

