

Кафедра електроніки  
Факультет авіонавігації, електроніки  
та телекомунікацій (ФАЕТ)

**Електронні системи**  
**Electronic Systems**

Тема 4  
Lectures #4&5

**Яновський, Фелікс Йосипович**  
професор, доктор технічних наук,  
лауреат Державної премії України, IEEE Fellow  
Завідувач кафедри електроніки НАУ

**Орієнтовний тематичний план лекцій**

**Основи теорії систем, сигнали і первинні перетворювачі електронних систем**

1. Вступ. Визначення і термінологія, класифікація	2
2. Характеристики електронних систем	2
3. Теорія систем, аналіз електронних систем	2
<b>4. Первинні перетворювачі електронних систем</b>	<b>4</b>
5. Сигнали електронних систем	2
6. Компоненти і обробка сигналів в ЕС	1
7. Експлуатаційні характеристики електронних систем	2
8. Технічні характеристики електронних систем	2
9. Технічна реалізація системи	1
10. Електронні системи мобільного зв'язку	6
11. Електронні системи локації	18
12. Електронні системи авіоніки	20
<b>Всього годин</b>	<b>64</b>

Первинні перетворювачі (датчики)

Sensing devices - Sensors

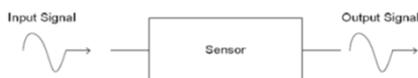
## Overview

- Sensors?
- Commonly Detectable Phenomenon
- Physical Principles – How Sensors Work?
- Need for Sensors
- Choosing a Sensor
- Examples

## Sensors?

American National Standards Institute

– A device which provides a usable output in response to a specified measurand



A sensor acquires a physical quantity and converts it into a signal suitable for processing (e.g. optical, electrical, mechanical)

- Nowadays common sensors convert measurement of physical phenomena into an electrical signal

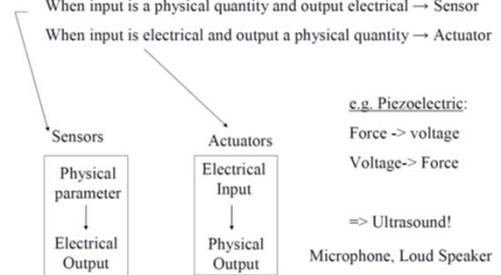
• Active element of a sensor is called a **transducer**  
Первинний перетворювач

## Transducer?

A device which converts one form of energy to another

When input is a physical quantity and output electrical → Sensor

When input is electrical and output a physical quantity → Actuator



### Commonly Detectable Phenomena

- Biological
- Chemical
- Electric
- Electromagnetic
- Heat/Temperature
- Magnetic
- Mechanical motion (displacement, velocity, acceleration, etc.)
- Optical
- Radioactivity

### Common Conversion Methods

- **Physical**
  - thermo-electric, thermo-elastic, thermo-magnetic, thermo-optic
  - photo-electric, photo-elastic, photo-magnetic,
  - electro-elastic, electro-magnetic
  - magneto-electric
- **Chemical**
  - chemical transport, physical transformation, electro-chemical
- **Biological**
  - biological transformation, physical transformation

### Commonly Measured Quantities

Stimulus	Quantity
Acoustic	Wave (amplitude, phase, polarization), Spectrum, Wave Velocity
Biological & Chemical	Fluid Concentrations (Gas or Liquid)
Electric	Charge, Voltage, Current, Electric Field (amplitude, phase, polarization), Conductivity, Permittivity
Magnetic	Magnetic Field (amplitude, phase, polarization), Flux, Permeability
Optical	Refractive Index, Reflectivity, Absorption
Thermal	Temperature, Flux, Specific Heat, Thermal Thermal Conductivity
Mechanical	Position, Velocity, Acceleration, Force, Strain, Stress, Pressure, Torque

### Physical Principles: Examples

- **Ampere's Law**
  - A current carrying conductor in a magnetic field experiences a force (e.g. galvanometer)
- **Curie-Weiss Law**
  - There is a transition temperature at which ferromagnetic materials exhibit paramagnetic behavior
- **Faraday's Law of Induction**
  - A coil resist a change in magnetic field by generating an opposing voltage/current (e.g. transformer)
- **Photoconductive Effect**
  - When light strikes certain semiconductor materials, the resistance of the material decreases (e.g. photoresistor)

### Choosing a Sensor

Environmental Factors	Economic Factors	Sensor Characteristics
Temperature range	Cost	Sensitivity
Humidity effects	Availability	Range
Corrosion	Lifetime	Stability
Size		Repeatability
Overrange protection		Linearity
Susceptibility to EM interferences		Error
Ruggedness		Response time
Power consumption		Frequency response
Self-test capability		

### Need for Sensors

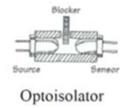
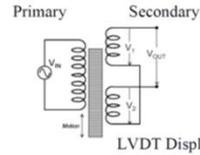
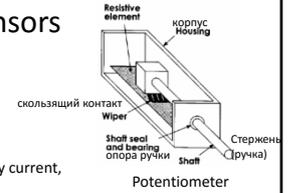
- Sensors are pervasive. They are embedded in our bodies, automobiles, airplanes, cellular telephones, radios, chemical plants, industrial plants and countless other applications.
- Without the use of sensors, there would be no automation !!
  - Imagine having to manually routine operations

### General purpose of sensors

- When we defined the notion "System" we meant electronic (or electric) system.
- However Input and Output quantities can be nonelectrical quantities. In majority of cases...
- Sensor (вимірювальний перетворювач, датчик) converts different nonelectrical signals into electrical. Also: transducer.
- There can be **Input transducer** and **Output transducer**.
- Examples:
  - A **microphone** converts oscillations of pressure (mechanical signal) into voltage – an **input transducer (SENSOR)**
  - A **direct current motor** converts voltage of the direct current into mechanical force – an **output transducer (ACTUATOR)**
- Normally input transducer – is a low power device (e.g.  $10^{-8}$ ) while output transducer can be high power (W, kW). But it is not a rule, e.g. MEMS - **Microelectromechanical systems**.

### Motion Sensors

- Monitor location of various parts in a system
  - absolute/relative position
  - angular/relative displacement
  - proximity
  - acceleration
- Principle of operation
  - Magnetic, resistive, capacitance, inductive, eddy current, etc.



### Structure of a system with sensors

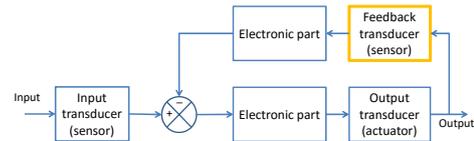
- Moreover, we can also find a sensor in the feedback loop, e.g. tachometer in the speed control system.
- One can represent a system that consists of electronic part and sensors:

#### Electronic open-loop system (without a feedback)



### Structure of a system with sensors

#### Electronic feedback system



- A sensor in the feedback loop. Such sensor is similar to an input sensor.
- Note: When we are talking about electric signals or parameters, we are not limited by voltage or current intensity. A system can have a sensor, which converts geometric angle into the phase shift, or a change of temperature into the change of resistance that then will be transformed into voltage, etc.

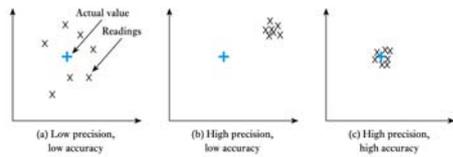
- Almost any physical property of a material that changes in response to some excitation can be used to produce a sensor
  - widely used sensors include those that are:
    - resistive
    - inductive
    - capacitive
    - piezoelectric
    - photoresistive
    - elastic
    - thermal.
  - in this lecture we will look at several examples

### Describing Sensor Performance

- **Range**
  - maximum and minimum values that can be measured
- **Resolution or discrimination**
  - smallest discernible change in the measured value
- **Error**
  - difference between the measured and actual values
    - random errors
    - systematic errors
- **Accuracy, inaccuracy, uncertainty**
  - accuracy is a measure of the maximum expected error

- **Precision**

– a measure of the lack of random errors (scatter)



- **Linearity**

– maximum deviation from a 'straight-line' response  
– normally expressed as a percentage of the full-scale value

- **Sensitivity**

– a measure of the change produced at the output for a given change in the quantity being measured

## Temperature sensors

- **Resistive thermometers**

– typical devices use platinum wire (such a device is called a **platinum resistance thermometers** or **PRT**)  
– *linear* but has *poor sensitivity*



A typical PRT element



A sheathed PRT (Platinum resistance thermometer)

- **Thermistors**

– use materials with a high thermal coefficient of resistance  
– *sensitive* but highly *non-linear*



A typical disc thermistor



A threaded thermistor

- **pn junctions**

– a semiconductor device with the properties of a diode (we will consider semiconductors and diodes later)  
– *inexpensive, linear* and *easy to use*  
– *limited temperature range* (perhaps  $-50^{\circ}\text{C}$  to  $150^{\circ}\text{C}$ ) due to nature of semiconductor material



pn-junction sensor

## Light Sensors

- **Photovoltaic**

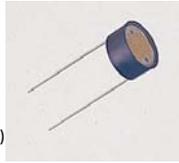
– light falling on a *pn-junction* can be used to generate electricity from light energy (as in a **solar cell**)  
– small devices used as sensors are called **photodiodes**  
– fast acting, but the voltage produced is *not* linearly related to light intensity



A typical photodiode

- **Photoconductive**

- such devices do not produce electricity, but simply change their resistance
- photodiode (as described earlier) can be used in this way to produce a linear device
- phototransistors act like photodiodes but with greater sensitivity
- light-dependent resistors (LDRs) are slow, but respond like the human eye

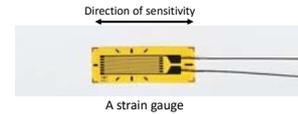


A light-dependent resistor (LDR)

## Force Sensors

- **Strain gauge**

- stretching in one direction increases the resistance of the device, while stretching in the other direction has little effect
- can be bonded to a surface to measure strain
- used within load cells and pressure sensors



## Displacement Sensors

- **Potentiometers**

- resistive potentiometers are one of the most widely used forms of position sensor
- can be angular or linear
- consists of a length of resistive material with a sliding contact onto the resistive track
- when used as a position transducer a potential is placed across the two end terminals, the voltage on the sliding contact is then proportional to its position
- an inexpensive and easy to use sensor

- **Inductive proximity sensors**

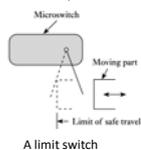
- coil inductance is greatly affected by the presence of ferromagnetic materials
- here the proximity of a ferromagnetic plate is determined by measuring the inductance of a coil
- we will look at inductance in later lectures



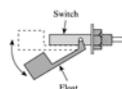
Inductive proximity sensors

- **Switches**

- simplest form of *digital* displacement sensor
- many forms: lever or push-rod operated microswitches; float switches; pressure switches; etc.



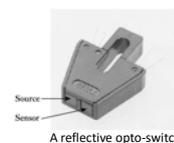
A limit switch



A float switch

- **Opto-switches**

- consist of a light source and a light sensor within a single unit
- 2 common forms are the reflective and slotted types



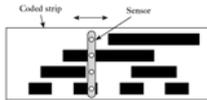
A reflective opto-switch



A slotted opto-switch

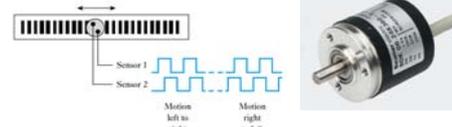
### • Absolute position encoders

- a pattern of light and dark strips is printed on to a strip and is detected by a sensor that moves along it
- the pattern takes the form of a series of lines as shown below
- it is arranged so that the combination is unique at each point
- sensor is an array of photodiodes



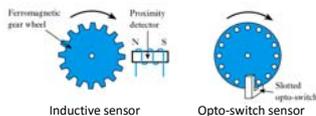
### • Incremental position encoder

- uses a single line that alternates black/white
- two slightly offset sensors produce outputs as shown below
- detects motion in either direction, pulses are counted to determine absolute position (which must be initially reset)



### • Other counting techniques

- several methods use counting to determine position
- two examples are given below



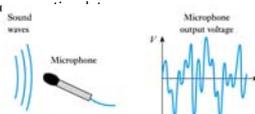
## Motion Sensors

- Motion sensors measure quantities such as velocity and acceleration
  - can be obtained by differentiating displacement
  - differentiation tends to amplify high-frequency noise
- Alternatively can be measured directly
  - some sensors give velocity directly
    - e.g. measuring *frequency* of pulses in the counting techniques described earlier gives speed rather than position
  - some sensors give acceleration directly
    - e.g. accelerometers usually measure the force on a mass

## Sound Sensors

### • Microphones

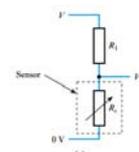
- a number of forms are available
- e.g. carbon (resistive), capacitive, piezoelectric and moving-coil microphones
- moving-coil devices use a magnet and a coil attached to a diaphragm – we will discuss electret



## Sensor Interfacing

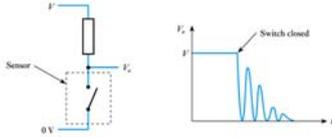
### • Resistive devices

- can be very simple
  - e.g. in a potentiometer, with a fixed voltage across the outer terminals, the voltage on the third is directly related to position
- where the resistance of the device changes with the quantity being measured, this change can be converted into a voltage signal using a potential divider – as shown
- the output of this arrangement is *not* linearly related to the change in resistance



• **Switches**

- switch interfacing is also simple
  - can use a single resistor as below to produce a voltage output
  - all mechanical switches suffer from **switch bounce**



• **Capacitive and inductive sensors**

- sensors that change their capacitance or inductance in response to external influences normally require the use of alternating current (AC) circuitry
- such circuits need not be complicated
- we will consider AC circuits in later lectures

**Key Points**

- A wide range of sensors is available
- Some sensors produce an output voltage related to the measured quantity and therefore supply power
- Other devices simply change their physical properties
- Some sensors produce an output that is linearly related to the quantity being measured, others do not
- Interfacing may be required to produce signals in the correct form

**Examples of sensors with their important parameters (Input transducers)**

Transducer type	Nature (parameter) of initial source	Power, W	Voltage, V	Intensity of current, A	Output parameter
Thermal converter (thermocouple)	Temperature	$0.5 \cdot 10^{-4}$	$10^{-3}$	$10^{-1}$	DC voltage
Photoelectric cell	Light	$0.5 \cdot 10^{-5}$	$10^{-1}$	$10^{-4}$	DC voltage
Manometer	Pressure	$0.5 \cdot 10^{-5}$	$10^{-1}$	$10^{-4}$	Resistance or voltage
Tachometer	Speed	$10^{-3}$	$10^0$	$10^{-3}$	DC voltage
Microphone	Sound	$10^{-8}$	$10^{-3}$	$10^{-5}$	AC voltage
EM vibration detector	Vibration	$0.25 \cdot 10^{-6}$	$10^{-2}$	$10^{-4}$	AC voltage
Inductosyn (angle solver)	Angle	$10^{-2} \cdot 10$	$10^{-3} \cdot 10$		Phase shift

**Typical output transducers (actuators)**

Transducer type	Power, W	Efficiency, %	Typical application
Electric motor	$1 - 10^6$	75-95	Control systems
Loudspeaker	$1 - 10^2$	3-10	Sound transmission systems
Galvanometer	$10^{-6}$ (total scale)	-	Measuring systems
Electrostatic voltmeter	$10^{-3}$ (total scale)	-	Measuring systems
Relay (actuator)	$10^{-4} - 10^{-1}$	-	Switching control systems
CRT	$10^{-7}$	$10^{-2}$	Measuring and display systems
Digital micromirror device (DMD)	-	-	Digital Light Processing technology (DLP)

DLP projector



A display device based on of MEMS technology that uses a DMD

**Transducers of a mixed type (input - output)**

Transducer type	Input quantity	Output quantity	Typical application
Strain sensor (Тензодатчик)	Force	Change of resistance	Measuring resistance force, shift, strain (механічна напруга або натяг – mech. stress or tension)
Force transducer (Динамометричний датчик)	Pressure and application of force (load)	Change of resistance	Measuring of load, pressure
Photoelectric cell (Фотоелемент)	Force of light	Voltage	Source of energy, electro-optical devices
Differential transducer (диференціальний перетворювач)	Linear movement	Change of inductance	Measuring of distance
Selsyn	Angular displacement	Change of AC voltage	Switching control systems
Thermocouple	Temperature	Voltage	Temperature control systems
Thermistor	-,-	Change of resistance	Temperature control systems
Tachometer	Angular speed	Voltage	Speed control systems – Speed feedback

### Conclusive definitions and discussion

- A sensor is a transducer whose purpose is to sense (that is, to detect) some characteristic of its environs.
- It detects events or changes in quantities and provides a corresponding output, generally as an electrical or optical signal.
- For example, a thermocouple converts temperature to an output voltage. But a mercury-in-glass thermometer is also a sensor; it converts the measured temperature into expansion and contraction of a liquid which can be read on a calibrated glass tube.
- With advances in micromachinery and easy-to-use microcontroller platforms, the uses of sensors have expanded beyond the more traditional fields of temperature, pressure or flow measurement, e.g. MARG sensors (Magnetic Angular Rate Gravity).

### Sensor's sensitivity

- A sensor's sensitivity indicates how much the sensor's output changes when the input quantity being measured changes. For instance, if the mercury in a thermometer moves 1 cm when the temperature changes by 1 °C, the sensitivity is 1 cm/°C (it is basically the slope  $Dy/Dx$  assuming a linear characteristic).
- Some sensors can also have an impact on what they measure; for instance, a room temperature thermometer inserted into a hot cup of liquid cools the liquid while the liquid heats the thermometer.
- Sensors need to be designed to have a small effect on what is measured; making the sensor smaller often improves this and may introduce other advantages.
- Technological progress allows more and more sensors to be manufactured on a microscopic scale as microsensors using MEMS technology. In most cases, a microsensor reaches a significantly higher speed and sensitivity compared with macroscopic approaches.

### Sensors. Types of measured quantities and fields

- 1 Acoustic, sound, vibration
- 2 Automotive, transportation
- 3 Chemical
- 4 Electric current, electric potential, magnetic, radio
- 5 Environment, weather, moisture, humidity
- 6 Flow, fluid velocity
- 7 Ionizing radiation, subatomic particles
- 8 Navigation instruments
- 9 Position, angle, displacement, distance, speed, acceleration
- 10 Optical, light, imaging, photon
- 11 Pressure
- 12 Force, density, level
- 13 Thermal, heat, temperature
- 14 Proximity, presence

[http://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_sensors#Acoustic.2C\\_sound.2C\\_vibration](http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_sensors#Acoustic.2C_sound.2C_vibration)

### Acoustic, sound, vibration

- Geophone (A geophone is a device that converts ground movement (displacement) into voltage)
- Hydrophone (A hydrophone is a microphone designed to be used underwater for recording or listening to underwater sound)
- Lace Sensor - a guitar pickup (A pickup device is a transducer that captures mechanical vibrations from stringed instruments such as the electric guitar, electric bass guitar)



- Microphone (A microphone is an acoustic-to-electric transducer or sensor that converts sound in air into an electrical signal)

### Automotive, transportation

- Air-fuel ratio meter
- Blind spot monitor
- Crankshaft position sensor (колический вал)
- Curb feeler, used to warn driver of curbs (curb – бордюор, ороорожа)
- Defect detector, used on railroads to detect axle and signal problems in passing trains
- Engine coolant temperature sensor, or ECT sensor, used to measure the engine temperature
- Hall effect sensor, used to time the speed of wheels and shafts
- MAP sensor, Manifold Absolute Pressure, used in regulating fuel metering. (абсолютное давление во впускном коллекторе)
- Oxygen sensor, used to monitor the amount of oxygen in the exhaust
- Parking sensors, used to alert the driver of unseen obstacles during parking maneuvers
- Radar gun, used to detect the speed of other objects
- Speedometer, used measure the instantaneous speed of a land vehicle
- Speed sensor, used to detect the speed of an object
- Throttle position sensor, used to monitor the position of the throttle in an internal combustion engine
- Tire-pressure monitoring sensor, used to monitor the air pressure inside the tires
- Transmission fluid temperature sensor, used to measure the temperature of the transmission fluid
- Variable reluctance sensor, used to measure position and speed of moving metal components
- Vehicle speed sensor (VSS), used to measure the speed of the vehicle
- Water sensor or water-in-fuel sensor, used to indicate the presence of water in fuel
- Wheel speed sensor, used for reading the speed of a vehicle's wheel rotation

### Characteristics of sensors

- We could see a huge variety of sensors.
- Considering sensors here we focus on the characteristic of conversion but not on the features of conversion methods
- A transducer can be considered as a black box with definite dependence between input and output quantities.
- As usually, we can be interested in accuracy, linearity, resolution.
- Also, frequency characteristic, noise properties, input and output impedance, etc.

**Structure of a sensor**

- Measuring transducer – вимірювальний перетворювач
- Sensing element – чутливий орган
  - Detector – детектор (radiation, field, & particles)
  - Receiver - приймач
  - Probe - зонд
  - Gage head – вимірювальна головка
- In general case a sensor can consist of several transducers



Функциональная схема датчика: Пр1, Пр2, Пр3 – преобразователи;  $F_1$  – входная физическая величина;  $F_2, F_3$  – промежуточные физические величины;  $U$  – выходной электрический сигнал

Датчиком иногда называют средство измерений, представляющее собой конструктивно завершенное устройство, размещаемое в процессе измерения непосредственно в зоне исследуемого объекта и выполняющее функцию измерительного преобразователя.

В английском языке слово «sensor» означает «сенсор», «датчик», «чувствительный элемент».

**Types of sensor classification**



**Classification based on a type of the input & output signals**



**A physical principle of operation**



**Some physical effects that are used in sensors**

N п/п	Название эффекта	Краткое содержание эффекта
1	Акустический парамагнитный резонанс	Резонансное поглощение энергии ультразвуковой волны определенной частоты при ее прохождении сквозь парамагнитный кристалл, который находится в постоянном магнитном поле
2	Вентильный фотоэффект	Возникновение электродвижущей силы в системе, которая включает контакт двух разных полупроводников или полупроводника и металла, при поглощении оптического излучения
3	Вихревые токи (токи Фуко)	Возникновение замкнутых электрических токов в массивном электропроводнике при изменении интенсивности магнитного потока, который пересекает его
4	Гальваноупругий магнитный эффект	Изменение электрического сопротивления ферромагнетика, размещенного в магнитном поле, при воздействии одностороннего упругого напряжения растяжением или сжатием
5	Действие магнитного поля на контур с электрическим током	Вращение рамки с током под действием вращательного момента, который возникает при размещении рамки в однородном магнитном поле

## Some physical effects that are used in sensors

6	Электротепловой эффект	Изменение температуры пьезоэлектрического кристалла под воздействием электрического поля
7	Электростатическая индукция	Возникновение на поверхности проводника или диэлектрика одинаковых и противоположных по знаку зарядов под действием внешнего электрического поля
8	Электромагнитная индукция	Возникновение электродвижущей силы индукции в электропроводящем контуре при изменении во времени магнитного потока через ограниченную контуром поверхность
9	Эффект Зеебека	В электрической цепи из последовательно соединенных различных проводников, контакты между которыми имеют разные температуры, возникает электродвижущая сила
10	Эффект Томсона	В проводнике с током, вдоль которого имеется градиент температуры, выделяется или поглощается теплота (кроме выделения Джоулевой теплоты)

## Some physical effects that are used in sensors

N п/п	Название эффекта	Краткое содержание эффекта
11	Эффект Пельтье	При протекании электрического тока через контакт разнородных металлов в нем выделяется или поглощается теплота
12	Эффект Холла	Между боковыми границами пластины из металлического проводника или полупроводника, вдоль которой протекает электрический ток, при действии перпендикулярного магнитного поля возникает разность потенциалов
13	Электрострикция	Деформация диэлектрика под воздействием внешнего электрического поля, пропорциональная квадрату напряженности поля
14	Эффект Фарадея	Вращение плоскости поляризации линейно поляризуемого света, который распространяется в изотропном веществе вдоль постоянного магнитного поля, в котором находится это вещество
15	Эффект Нерста	Возникновение продольного градиента температуры в проводнике с током, который находится в магнитном поле
16	Эффект Нерста—Эттингсауэна	Возникновение электрического поля в твердом проводнике при наличии градиента температуры и перпендикулярного к нему магнитного поля
17	Эффект Риги—Ледюка	Возникновение вторичной разности температур в проводнике с перепадом температуры, размещенном в магнитном поле перпендикулярно к тепловому потоку

18	Закон Кулона	Взаимодействие двух заряженных тел с силой, пропорциональной произведению их зарядов и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними
19	Закон всемирного тяготения	Действие на тело, которое находится в произвольной точке гравитационного поля, создаваемого массой тела, силы гравитации, которая зависит от массы этого тела, и напряженности гравитационного поля
20	Закон Ампера	Возникновение механической силы, которая действует на проводник с током, при перемещении проводника во внешнем магнитном поле
21	Закон Ома	Возникновение в проводнике электрического тока, плотность которого пропорциональна напряженности поля
22	Закон Био—Савара—Лапласа	При протекании по электропроводнику электрического тока вокруг него в пространстве возникает магнитное поле
23	Обратный пьезоэлектрический эффект	В анизотропных кристаллических диэлектриках под действием электрического поля возникает механическая деформация
24	Закон Джоуля—Ленца	В электропроводнике выделяется тепловая энергия, количество которой пропорционально квадрату силы тока, сопротивлению проводника и времени протекания тока
25	Закон Фарадея	Количество вещества, которое выделяется или разлагается на электродах при электролизе, пропорционально количеству электричества (произведению силы тока на время электролиза), которое прошло через поверхность контакта электрода с раствором

26	Зависимость Нерста равновесного потенциала электрода от концентрации вещества	Равновесный потенциал металлического электрода в растворе неорганического вещества пропорционален газовой постоянной, температуре и логарифму концентрации вещества и обратно пропорционален заряду иона и константе Фарадея
27	Зависимость электропроводности жидкого вещества от ее концентрации	Электропроводность жидкого вещества в определенном объеме пропорциональна площади электрода и удельной электропроводности вещества и обратно пропорциональна длине электрода
28	Зависимость температуры плавления кристаллических веществ при увеличении внешнего давления	Изменение температуры плавления кристаллических веществ при увеличении внешнего давления. Если удельный объем жидкой фазы больше, чем твердой, то температура плавления увеличивается
29	Зависимость электрического сопротивления твердого тела от давления	Изменение электрического сопротивления твердого тела при изменении внешнего давления в области высоких температур. В большинстве веществ электрическое сопротивление уменьшается с увеличением давления
30	Зависимость показателя преломления газа от плотности	Увеличение показателя преломления газа с увеличением его плотности. Зависимость является квадратичной

31	Зависимость показателя преломления газов от давления	Увеличение показателя преломления газа при увеличении его давления. Зависимость в широком диапазоне изменений давления описывается полиномом некоторой степени
32	Зависимость модуля упругости металлов от температуры	Уменьшение модуля упругости металлов с увеличением температуры
33	Зависимость границы текучести металлов и сплавов от температуры	Уменьшение границы текучести металлов и сплавов с ростом температуры. Зависимость является близкой к экспоненциальной
34	Зависимость плотности металлов от температуры при переходе через точку плавления	Скачкообразное уменьшение плотности металлов с увеличением температуры вблизи температуры плавления
35	Звуколюминесценция	Свечение жидкости под действием интенсивной акустической волны (при акустической кавитации)

36	Ионизация газа под действием электрического поля	Под действием сильного электрического поля атомы и молекулы газа превращаются в положительные и отрицательные ионы и свободные электроны
37	Ионизация газа рентгеновским излучением	Возникновение положительных и отрицательных ионов и свободных электронов в газе под действием электромагнитного излучения рентгеновского диапазона
38	Катодolumинесценция	Излучение света, который возникает при возбуждении люминофора электронным пучком
39	Магниторезистивный эффект	Изменение электрического сопротивления твердых проводников под действием магнитного поля
40	Магнитострикция	Изменение формы и размеров тела при его намагничивании
41	Магнитный гистерезис	Неоднозначная зависимость намагниченности ферромагнитного тела от напряженности внешнего магнитного поля. При циклическом изменении напряженности поля кривая изменения намагниченности имеет вид петли магнитного гистерезиса
42	Намагничивание тел	Возникновение или изменение намагниченности вещества при действии на него внешнего магнитного поля. Дипольности намагничиваются против поля, пара- и ферромагнетика — в направлении поля

43	Пьезоэлектрический эффект	Изменение поляризации некоторых кристаллических диэлектриков (пьезоэлектриков) при механической деформации
44	Пьезомагнитный эффект	Возникновение в веществе намагниченности под действием внешнего давления
45	Пироэлектрический эффект	Возникновение электрических зарядов на поверхности некоторых кристаллических диэлектриков (пироэлектриков) при их нагревании или охлаждении
46	Поверхностный эффект	Переменный ток в электропроводнике неравномерно распределяется по площади его сечения. Неравномерность плотности тока увеличивается с увеличением частоты тока и площади сечения проводника
47	Поглощение звука	Уменьшение интенсивности акустической волны, которая проходит сквозь вещество, в результате необратимого перехода энергии волны в другие виды энергии, в частности, в теплоту
48	Поглощение света	Уменьшение интенсивности электромагнитного излучения при прохождении сквозь вещество
49	Поляризация диэлектриков	Возникновение объемного дипольного момента диэлектрика под действием электрического поля. На поверхности диэлектрика появляются связанные поляризуемые заряды
50	Сверхпроводимость	Скачкообразное уменьшение практически до нуля электрического сопротивления ряда металлических проводников и сверхпроводящих полупроводников при охлаждении ниже критической температуры, характерной для данного материала

51	Сила Лоренца	Действие на заряженную частицу, которая движется в магнитном поле, силы, перпендикулярной к вектору магнитной индукции поля и вектору скорости движения частицы
52	Тензорезистивный эффект	Изменение электрического сопротивления в твердых электропроводниках под действием растягивающих или сжимающих напряжений
53	Тепловое расширение тел	Изменение размеров тела при его нагревании. Характеризуется коэффициентом линейного (для твердых тел) или объемного (для жидких и газообразных тел) теплового расширения
54	Термоэлектронная эмиссия	Излучение электронов нагретыми телами в вакуум или другую среду
55	Терморезистивный эффект	Изменение электрического сопротивления электропроводных тел при изменении их температуры. В металлических проводниках сопротивление растет с ростом температуры, в жидких электролитах и полупроводниках — уменьшается
56	Фотоэлектронная эмиссия (внешний фотоэффект)	Излучение электронов твердыми телами и жидкостями в вакуум или другую среду под действием электромагнитного излучения