

Road to IPhO

Физика индукционной плиты

Часть А. Введение



Рис. 1. Индукционная плита

В этой задаче исследуется принцип работы индукционной плиты. Основная часть этого устройства – катушка, по которой течёт переменный ток, что приводит к нагреву стоящей на плите кастрюли. Этот метод готовки безопасный, чистый и быстрый.

Задача состоит из трёх частей. В первой части измеряется индуктивность катушек (L) и их внутреннее сопротивление (R_L). Во второй части изучается скин-эффект в металлических пластинах, которые моделируют сковородки. В последней части определяется удельная теплоёмкость (c) разных пластин и их эффективное сопротивление (R_{LOAD}).

Часть В. Оборудование

1. Генератор переменного тока (диапазон частот от 20 Гц до 100 кГц)
2. Осциллограф «Zoyi» + провод BNC
3. Две одинаковые катушки в пластиковых держателях
4. Секундомер
5. 4 провода «банан–банан»
6. 4 провода «банан–пин»
7. Мощный резистор R_1 (1 Ом, 100 Вт), закреплённый на чёрной коробке
8. Чёрная коробка с четырьмя разъёмами типа «банан»
9. Конденсаторы: 470 нФ (коричневый), 470 мкФ, 1000 мкФ, 2200 мкФ (тёмно-синие цилиндры)
10. Шестигранный ключ (Г-образный)
11. Алюминиевая пластина с терморезистором, размер = 2 см × 2 см, толщина = 0.73 мм. Пластина матовая с двух сторон
12. Пластина из сплава SS410 с терморезистором, размер = 2 см × 2 см, толщина = 0.76 мм. Пластина зеркальная с двух сторон
13. Алюминиевые пластины (5 штук), размер = 2.7 см × 4.6 см, толщина = 0.73 мм, магнитная проницаемость $\mu_r = 1$. Пластины матовые с двух сторон
14. Медные пластины (5 штук), размер = 2.7 см × 4.6 см, толщина = 0.71 мм, магнитная проницаемость $\mu_r = 1$. Пластины имеют красноватый цвет

Road to IPhO

15. Пластины из сплава SS304 (4 штуки), размер = 2.7 см × 4.6 см, толщина = 0.72 мм, магнитная проницаемость $\mu_r = 1$. Одна сторона пластин матовая, а другая зеркальная
16. Пластины из сплава SS410 (4 штуки), размер = 2.7 см × 4.6 см, толщина = 0.76 мм, магнитная проницаемость $\mu_r = 700$. Пластины зеркальные с двух сторон
17. Блок питания и USB-C кабель для осциллографа



Рис. 2. Оборудование. Отдельные предметы указаны в списке ниже

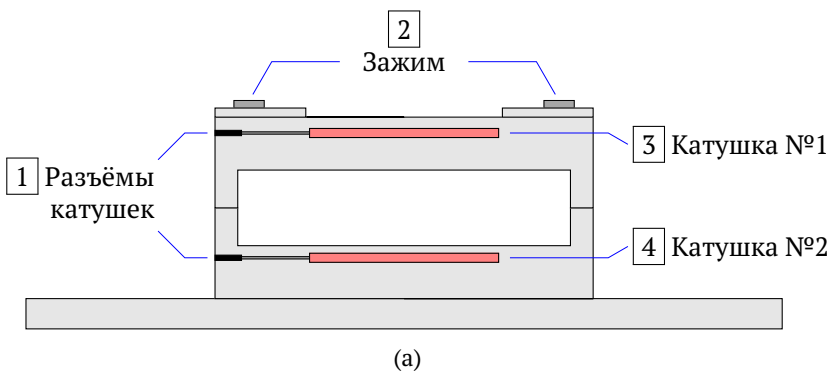


Рис. 3. Схема индукционной плиты:

1. «пин» разъёмы катушек
2. зажимы
3. катушка №1
4. катушка №2

Road to IPhO

Список констант

Величина	Обозначение	Значение
Постоянная Стефана–Больцмана	σ_S	$5.670 \times 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$
Магнитная постоянная	μ_0	$4\pi \times 10^{-7} \text{ Гн/м}$
Плотность алюминия	ρ_{Al}	2700 кг/м^3
Плотность сплава SS410	ρ_{SS410}	7700 кг/м^3
Коэффициент излучения алюминия	e_{Al}	0.65
Коэффициент излучения сплава SS410	e_{SS410}	0.8

Примечания

1. Пожалуйста, прочитайте часть **D**. Инструкция по работе с оборудованием.
2. Во всех экспериментах при сборке последовательной RLC -цепи необходимо включать конденсатор C , потому что иначе (то есть при сборке RL -цепи) катушка может перегреться.
3. **Оценка погрешностей не требуется нигде.**
4. Во всех экспериментах ручка «Waveform» генератора переменного тока должна быть в положении «Sine».
5. Максимальная амплитуда силы тока через катушку должна быть 2 А.
6. Используйте осциллограф в режиме «Oscilloscope» для измерения напряжения, частоты и определения формы сигнала. Режим «Multimeter» используйте для измерения сопротивления.
7. Вы можете соединять щуп осциллографа **2** (см. список оборудования) с проводом «банан–банан» **5** для упрощения подключения к разъёмам типа «банан».

Часть С. Эксперимент

Эксперимент №1. Катушка индуктивности (4.5 балла)

Катушка индуктивности – ключевой компонент индукционной плиты. В этом эксперименте измеряется коэффициент самоиндукции (L) катушки №1 (верхняя на рис. 3b). Будем рассматривать её как идеальную катушку с коэффициентом самоиндукции L , последовательно соединённую с резистором R_L .

Вам нужно будет собрать последовательную RLC -цепь с мощным резистором R_1 , катушкой №1 и одним из четырех конденсаторов. Обратите внимание, что напряжение на выходе генератора может меняться, когда вы меняете его частоту, так как при этом меняется импеданс нагрузки.

1.1 Нарисуйте схему собранной цепи и подпишите все основные элементы. Вкладом сопротивления соединительных проводов (R_C) в общее сопротивление цепи (R_{TOT}) пренебречь нельзя. Определите R_C с помощью омметра. **0.4**

1.2 Определите резонансную частоту RLC -цепи в двух случаях: с конденсаторами $C = 470 \text{ нФ}$ и 2200 мкФ . Результаты измерений представьте в таблице. Постройте резонансные кривые и определите L . **1.2**

1.3 В предыдущем пункте для одного из конденсаторов резонансная кривая непригодна для точного определения L . Предложите линеаризацию, позволяющую определить L и R_L из экспериментов с последовательными RLC -цепями. **0.5**

1.4 Повторите эксперимент, используя два других конденсатора: $C = 470 \text{ мкФ}$ и 1000 мкФ . Запишите данные измерений. Исследуйте необходимый диапазон частот и построьте линеаризованные графики для всех четырёх конденсаторов. **1.4**

Road to IPhO

1.5 Определите R_L и L во всех четырёх экспериментах. Рассчитайте их средние значения.

1.0

Эксперимент №2. Взаимная индукция и толщина скин-слоя (8.1 балла)

Внимание

1. В эксперименте №2 соберите последовательную RLC -цепь с конденсатором $C = 1000$ мкФ.
2. Если сигнал на входе осциллографа слишком слаб, вы можете:
 - 1) Увеличить сигнал в 10 раз, используя настройки осциллографа: MENU→F4, далее переключить параметр «PROBE» между 1X и 10X.
 - 2) Нажать «HOLD/SAVE», чтобы зафиксировать сигнал на экране.
3. Измерение напряжения с использованием «Vmax» может быть неточным в случае наличия шумов. Измеряйте напряжение непосредственно по осциллограмме.

Взаимная индукция

В этом эксперименте №2 используйте две катушки (см. рис. 4), но без металлических пластин. Согласно закону Фарадея, изменение тока в одной катушке индуцирует напряжение на концах второй. Далее требуется определить коэффициент взаимной индукции катушек M .

2.1 Нарисуйте схему измерений для определения коэффициента взаимной индукции катушек.

0.4

2.2 Проведите измерения M дважды, меняя катушки ролями. Запишите данные и постройте необходимые графики для каждой конфигурации.

1.0

2.3 Определите коэффициент взаимной индукции M для каждой конфигурации.

0.4

Толщина скин-слоя

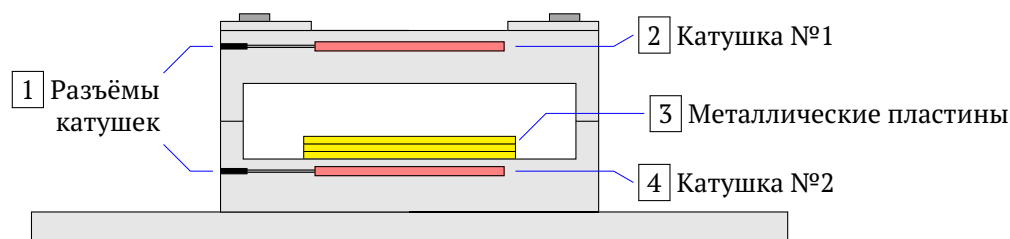


Рис. 4. Измерение толщины скин-слоя:

1. «пин» разъёмы катушек
2. катушка №1
3. металлические пластины
4. катушка №2

Скин-слой играет важную роль при описании индукционной плиты. Толщина скин-слоя определяет глубину проникновения электромагнитного поля, индуцированного переменным током, внутрь проводника. Для изготовления сковородок можно использовать разные металлы. В данной части исследуется зависимость толщины скин-слоя различных металлов от частоты, а также вычисляется их проводимость σ .

Используйте катушку №1 как первичную, катушку №2 как вторичную. Толщина металла (~ 3 мм) мала по сравнению с расстоянием между катушками (15 мм), поэтому в отсутствие пластин можно считать поле вблизи вторичной катушки однородным.

Road to IPhO

Согласно уравнениям Максвелла, когда переменное электромагнитное поле проникает в проводник, его амплитуда экспоненциально уменьшается с глубиной проникновения z :

$$B(z) = B_0 e^{-z/\delta} \cos(\omega t - z/\delta + \phi)$$

где B_0 – амплитуда магнитного поля перед входением в проводник, δ – толщина скин-слоя, ϕ – фаза.

Примечание: в этом эксперименте не учитывайте фазовую добавку $(-z/\delta + \phi)$.

Глубина скин-слоя определяется выражением:

$$\delta = \sqrt{\frac{\sigma^m f^n}{\pi \mu}}$$

где σ – проводимость, f – частота, $\mu = \mu_r \cdot \mu_0$ – абсолютная магнитная проницаемость металла ($\mu = \mu_r \cdot \mu_0$), m и n – целые числа, которые требуется определить в эксперименте.

Измерения проводятся для четырёх металлов:

1. Алюминий
2. Медь
3. Сплав SS304
4. Сплав SS410

Если поместить металлическую пластину между катушками, напряжение на вторичной катушке будет уменьшаться из-за экранирования вихревыми токами.

Примечание: Для начала определите подходящий диапазон частот, в котором наблюдается значительное изменение напряжения на вторичной катушке.

2.4 Предложите метод измерений и проведите эксперимент для определения n (ответ округлите до целого значения) для каждого из металлов. Запишите необходимые уравнения. Не обязательно строить графики для промежуточных вычислений, например, вы можете использовать МНК. Приведите результаты измерений и постройте окончательные графики, чтобы получить значения n и σ (значение проводимости потребуется в пункте 2.6). **5.5**
Определите один металл, для которого результаты измерений оказываются плохими из-за малой глубины скин-слоя. В пунктах 2.5 и 2.6 не нужно обрабатывать данные для выбранного металла.

2.5 Используя метод размерностей, определите показатель степени m . **0.2**

2.6 Определите σ для трёх металлов, для которых в 2.4 получены хорошие результаты измерений. **0.6**

Эксперимент №3, «Стряпня». Удельная теплоемкость и эффективное сопротивление нагрузки (7.4 балла)

Примечания

1. В этом эксперименте соберите последовательную RLC -цепь с $C = 1000$ мкФ.
2. **Внимание!** Амплитуда тока через катушку не должна превышать 2 А, чтобы избежать перегрева.
3. Используйте частоту примерно $f = 40$ кГц.

В этом эксперименте исследуются алюминиевая пластина и пластина из сплава SS410. Возьмите алюминиевую пластину (11 в списке оборудования) и закрепите ее на держателе. Затем переверните держатель, как показано на рис. 5. **Используйте катушку №2**, которая отдалена от пластины, так что теплообменом между ними можно пренебречь.

Road to IPhO

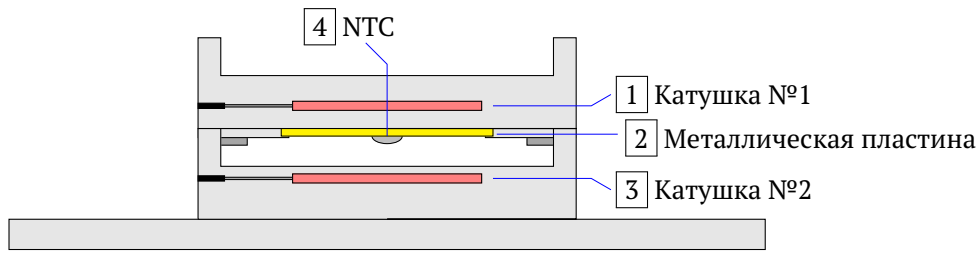


Рис. 5. Схема экспериментальной установки:

1. катушка №1
2. металлические пластинки
3. катушка №2
4. терморезистор

Поместите установку внутрь черной коробки (**8** в списке оборудования). В этом случае можно пренебречь конвекцией. Металлическая пластина расположена на пластиковом держателе (который не проводит тепло), так что теплопроводностью также можно пренебречь. Считайте, что потери тепла происходят только за счет излучения. Мощность излучения тела температурой T определяется формулой:

$$P_{\text{rad}} = eA\sigma_S T^4$$

где e – коэффициент излучения, σ_S – постоянная Стефана-Больцмана, A – площадь излучающей поверхности тела.

Температуру металлической пластины можно определить, измеряя сопротивление прикрепленного терморезистора, которое зависит от температуры следующим образом:

$$R_{\text{NTC}} = R_0 \exp\{[B(1/T - 1/T_0)]\}$$

где $R_0 = 10$ кОм – номинальное сопротивление при температуре $T_0 = 298$ К, $B = 3950$ К – постоянная, T – температура терморезистора (в Кельвинах).

- | | |
|---|------------|
| 3.1 Нарисуйте схему, иллюстрирующую принцип работы индукционной плиты. Укажите все существенные физические величины. | 0.2 |
| 3.2 Предложите метод, позволяющий определить удельную теплоемкость (c) металлических пластин. Запишите необходимые уравнения. | 0.5 |
| 3.3 Проведите эксперимент для определения удельной теплоемкости алюминиевой пластины и постройте соответствующие графики. Используйте катушку №2 для нагрева пластины. | 1.5 |
| 3.4 Повторите пункт 3.3 для пластины из сплава SS410. | 1.5 |

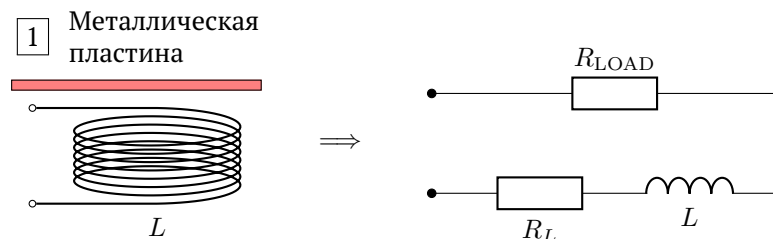


Рис. 6. Эквивалентная схема индукционной плиты, пластина с терморезистором

Нагревание металлической пластины можно моделировать, введя сопротивление нагрузки R_{LOAD} , как показано на рис. 6. Т.е. систему из катушки и пластины можно представить цепью из катушки с самоиндукцией L , сопротивлением R_L и сопротивления нагрузки R_{LOAD} .

Road to IPhO

3.5 Предложите метод измерений и проведите эксперимент, чтобы определить R_{LOAD} для алюминиевой пластины. Постройте график. **1.6**
Совет. Начните измерять примерно через 30 секунд после включения напряжения, чтобы мощность нагрева установилась, а тепло распределялось более равномерно.

3.6 Повторите пункт 3.5 для пластины из сплава SS410. **1.5**

3.7 Какую пластину лучше использовать в качестве сковородки? Выберите один из вариантов: (a) алюминиевая пластина или (b) пластина из сплава SS410 **0.1**

3.8 Какой физический параметр имеет наибольшее значение для эффекта индукционного нагрева в условиях предыдущего пункта? Выберите один из вариантов: **0.1**

- a) Проводимость
- b) Магнитная проницаемость
- c) Плотность
- d) Удельная теплоемкость
- e) Теплопроводность

3.9 Коэффициент полезного действия индукционной плиты (η) определяется как отношение мощности, выделяющейся в пластине, к мощности, подведенной к катушке. Вычислите коэффициент полезного действия для обеих металлических пластин. **0.4**

Часть D. Инструкция по работе с оборудованием

Генератор переменного тока



Рис. 7. Генератор переменного тока

Road to IPhO

Элементы

1. Световой индикатор питания
2. Ручка настройки амплитуды выходного сигнала
3. Ручка выбора диапазона частот
4. Ручки грубой (coarse) и точной (fine) настройки частоты выходного сигнала в рамках выбранного диапазона
5. Ручка выбора формы выходного сигнала: синусоидальная («Sine»), треугольная («Triangle») или прямоугольная («Square»). В этой задаче **всегда выбирайте синусоидальную форму («Sine»)**
6. Выход BNC до усиления: **в этой задаче не используется**. Нужен для отслеживания сигнала на входе во встроенный усилитель.
7. Выходы на разъём «банан»
8. Разъём для подключения питания
9. Кнопка включения
10. Блок предохранителей

Цифровой осциллограф

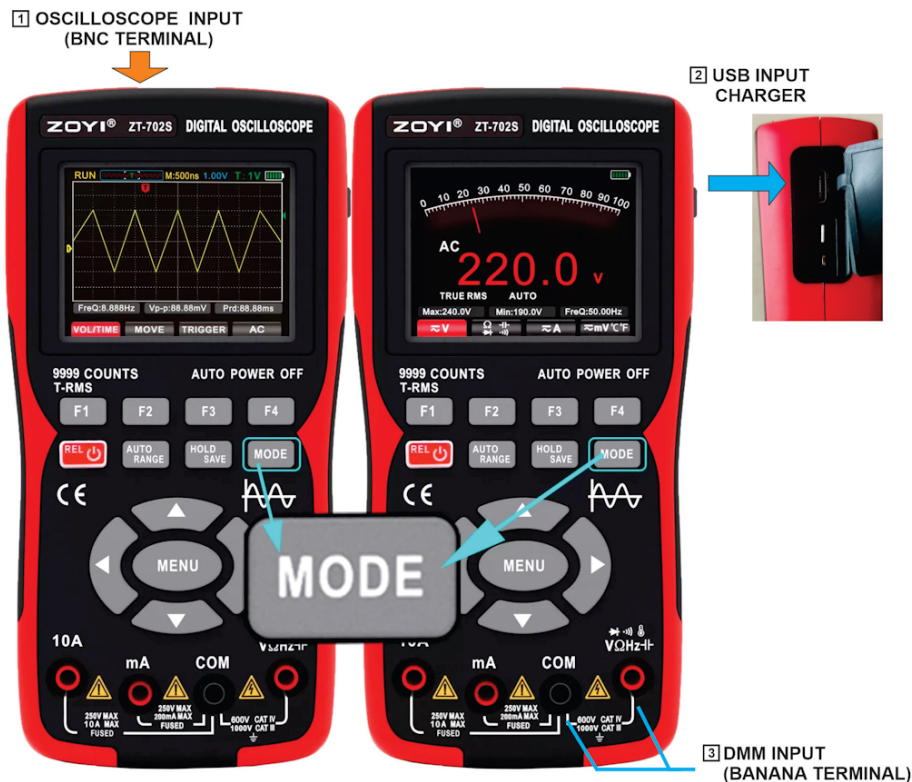


Рис. 8. Цифровой осциллограф

1. Кнопки управления

Эти кнопки позволяют управлять настройками, выбирать функции и регулировать измерения.

1. **Кнопки F1–F4.** Эти кнопки соответствуют меню, отображаемому внизу экрана.
2. **Кнопка HOLD/SAVE**

1) В режиме осциллографа

- Короткое нажатие: зафиксировать сигнал или возобновить отображение.
- Длительное нажатие: сохранить отображаемый сигнал.

Road to IPhO

2) В режиме мультиметра

- Короткое нажатие: зафиксировать показания или возобновить измерение напряжения.
- 3. **Кнопка MODE.** Используется для перехода между режимами осциллографа («Oscilloscope») и мультиметра («Multimeter»).
- 4. **Кнопка POWER.** Зажмите на ~ 2 секунды, чтобы включить или выключить прибор.
- 5. **Кнопка AUTO-RANGE.** Для автоподстройки диапазона измерений.
- 6. **Кнопка MENU**
 - Нажмите кнопку MENU, чтобы открыть развёрнутое меню функций.
 - Используйте кнопки со стрелками для перемещения по меню.
 - Используйте кнопки F1–F4 для выбора функций.
- 7. **Кнопки со стрелками (вверх, вниз, влево и вправо).** Используйте для подстройки параметров (к примеру, масштабов по напряжению и времени) и перемещения по меню.

2. Режим осциллографа

В режиме осциллографа прибор измеряет только напряжение и выводит на экран его зависимость от времени. В этом режиме прибор может измерять напряжение очень высокой частоты вплоть до 1 МГц.

1. **Подключение.** Используйте провод BNC (2 в списке оборудования) для подключения к входу наверху осциллографа. Для фиксации прокрутите его по часовой стрелке.
2. **Настройка пробника («PROBE»).** На проводе BNC имеется переключатель пробника, который может быть выставлен в одно из двух положений – X1 или X10.

Важно! Убедитесь, что пробник всегда выставлен на X1.

При необходимости вы также можете настроить пробник в меню осциллографа: нажмите кнопку MENU, чтобы открыть развёрнутое меню, а затем нажмите кнопку F4, чтобы переключать параметр «PROBE» между X1 и X10.

3. Настройки осциллографа

- **Автонастройка масштаба.** Для автоподстройки масштабов времени и напряжения.
- **Масштаб по вертикали и горизонтали.** Нажмите кнопку F1, чтобы открыть меню VOL/TIME. Используйте кнопки со стрелками вверх и вниз, чтобы выставить масштаб по напряжению. Используйте кнопки со стрелками вправо и влево, чтобы выставить масштаб по времени.
- **Смещение по вертикали и горизонтали.** Нажмите кнопку F2, чтобы открыть меню MOVE. Используйте кнопки со стрелками вправо и влево, чтобы смещать сигнал по горизонтали. Используйте кнопки со стрелками вверх и вниз, чтобы смещать сигнал по вертикали. Уровень триггера будет перемещаться вместе с сигналом.
- **Настройка триггера.** Нажмите кнопку F3, чтобы открыть меню TRIG. Используйте кнопки со стрелками вверх и вниз, чтобы смещать уровень триггера по вертикали.

Режим триггера. Нажмите кнопку MENU, чтобы открыть меню триггера, затем нажмите F2, чтобы настроить режим (Auto, Normal или Single).

Тип триггера. Нажмите кнопку MENU, чтобы открыть меню триггера, затем нажмите F3, чтобы выбрать тип. Вы можете выбрать триггер на подъём или на спад.
- **Тип связи.** Нажмите кнопку F4, чтобы переключаться между типами связи AC и DC. В этом эксперименте используется только тип связи AC.
- **Дополнительные примечания.** Амплитуду напряжения можно измерить как по клеткам на экране, так и с помощью показания «VPP» (разность между максимальным и минимальным напряжениями) или «Vmax» (максимальное напряжение).

Внимание. Иногда из-за шума в показаниях «Vmax» может быть немного больше, чем реальная амплитуда напряжения. Снимайте показания непосредственно по клеткам для более точного значения.

Road to IPhO

3. Режим мультиметра

В режиме мультиметра прибор может использоваться для измерения сопротивления и напряжения. В режиме измерения переменного напряжения (АС) он выдаёт результат с 4 значащими цифрами, однако может работать лишь в диапазоне частот от 40 Гц до 1 кГц.

1. **Подключение.** Подключите провода типа «банан» в разъёмы прибора.

2. Измерение напряжения

- Нажмите кнопку F1 для перехода в режим измерения напряжения.
- Нажмите F1 ещё раз для переключения между режимами измерения переменного (АС) и постоянного (DC) напряжения (в этом эксперименте используется только переменное напряжение).
- **Внимание!** Мультиметр может измерять переменное напряжение в диапазоне частот от 40 Гц до 1 кГц. Используйте режим осциллографа для измерения переменного напряжения частотой более 1 кГц.

3. Измерение сопротивления

- Нажмите F2 один раз для перехода в режим омметра. При повторных нажатиях F2 прибор будет циклически переходить в режимы омметра, прозвонки диода, измерения ёмкости и вновь вольтметра.

4. Дополнительные функции

1. Автоматическое выключение («Auto Off»)

- Нажмите кнопку MENU, чтобы открыть развёрнутое меню.
- Нажмите кнопку F2, чтобы выбрать время автоматического выключения.
- Рекомендуется выставить этот параметр на 15 минут, чтобы экономно расходовать заряд батареи, когда прибор не используется.

2. Яркость подсветки («BK Light»)

- Нажмите кнопку MENU, чтобы открыть развёрнутое меню.
- Нажмите кнопку F3, чтобы настроить яркость подсветки.

5. Зарядка прибора

Чтобы прибор всегда был готов к работе, следите за зарядом батареи.

1. Индикатор заряда батареи находится в верхнем правом углу экрана.
2. Для зарядки прибора используйте предоставленный адаптер и провод USB-C.
3. Старайтесь не использовать прибор во время зарядки, поскольку это создаёт дополнительные шумы в показаниях.
4. Для поддержания заряда батареи рекомендуется заряжать прибор, когда он не используется, и выставить автоматическое отключение.