

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ИНСТИТУТ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ
И ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Кафедра «Физика»

**ИЗУЧЕНИЕ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СООТНОШЕНИЙ
И РЕЖИМОВ РАБОТЫ
НЕОДНОРОДНОЙ ЗАМКНУТОЙ ЦЕПИ**

**Учебно-методическое пособие
для выполнения лабораторной работы
по физике**

Севастополь
СевГУ
2020

УДК 537
ББК 22.33
ИЗ9

Р е ц е н з е н т:

А.А. Ярошенко – профессор кафедры «Высшая математика»,
доктор. физ.-мат. наук, профессор

Ответственный за выпуск:

Е.В. Савченко – канд. пед. наук, доцент кафедры «Физика»

Составители: В.А. Лисютин, В.Л. Лучин

ИЗ9 Изучение энергетических соотношений и режимов работы неоднородной замкнутой цепи : учебно-методическое пособие для выполнения лабораторной работы по физике / Сост. В.А. Лисютин, В.Л. Лучин ; Министерство науки и высшего образования РФ, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Институт радиоэлектроники и информационной безопасности. – Севастополь: СевГУ, 2020. – 11 с. – Текст : электронный.

Учебно-методическое пособие предназначено для выполнения лабораторной работы раздела "Молекулярная физика и термодинамика" курса общей физики. В пособии дано описание лабораторных установок, краткий ход работы, методика обработки полученных результатов, контрольные вопросы. Пособие предназначено для выполнения лабораторных работ студентами 1-го курса всех специальностей и форм обучения инженерного профиля университета.

УДК 537
ББК 22.33

Рассмотрено и утверждено на заседании ученого совета Института радиоэлектроники и информационной безопасности Севастопольского государственного университета в качестве учебно-методического пособия, протокол № 6 от 31 января 2020 г.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

ИЗУЧЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СООТНОШЕНИЙ И РЕЖИМОВ РАБОТЫ НЕОДНОРОДНОЙ ЗАМКНУТОЙ ЦЕПИ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение простейшей замкнутой электрической цепи, содержащей источник тока и нагрузку. Определение полной, полезной, теряемой мощности и КПД. Изучение условия согласования генератора и нагрузки. Снятие нагрузочных кривых и определение внутреннего сопротивления источника тока.

2. БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Савельев И.В. Курс физики. В 3 т. Т.1: Механика. Молекулярная физика / И.В. Савельев. – Лань, 2008. – 352 с.
2. Трофимова Я.Т. Курс физики: учеб. пособие для вузов / Я.Т. Трофимова. – 19-е изд. – Академия, 2012. – 560 с.
3. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. – Академия, 2009. – 720 с.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Простейшая схема замкнутой электрической цепи, состоящая из источника тока и сопротивления нагрузки показана на рис.1.

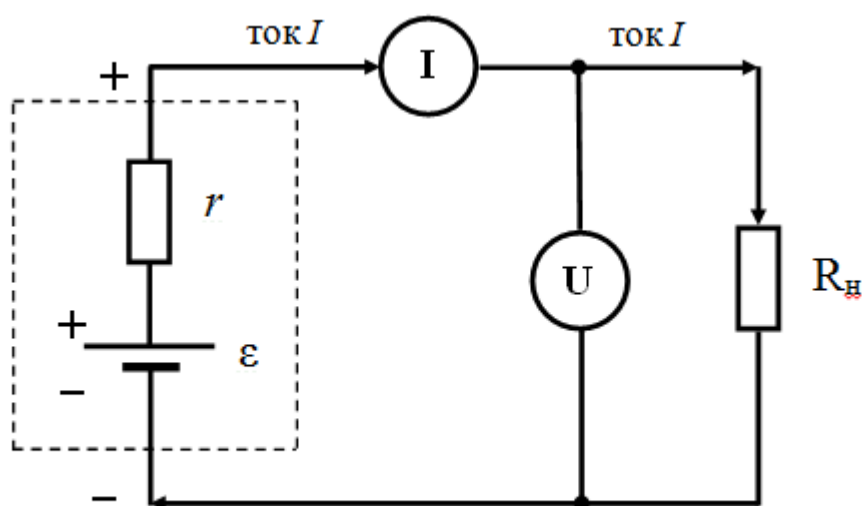


Рис. 1. Схема замкнутой электрической цепи, содержащая источник тока и сопротивление нагрузки. В цепь дополнительно включены идеальный амперметр и идеальный вольтметр

Электрическая цепь состоит из двух участков – внутреннего (внутри корпуса источника тока) и внешнего.

Внутренний участок (обведен пунктиром) содержит **источник ЭДС**, характеризуемый величиной **электродвижущей силы ЭДС «ε»** и **внутреннее сопротивление «r»**.

Внешний участок – это **сопротивление нагрузки $R_{H(агрузки)}$** . Электрическое сопротивление проводов, соединяющих внутренний и внешний участок пренебрежимо мало. Такая цепь, когда электрическими характеристиками соединительных проводов пренебрегают, называется цепью с сосредоточенными параметрами.

Во **внешней** цепи – через сопротивление нагрузки R_H , ток течет от положительного «+» к отрицательному «-» зажимам источника под действием разности потенциалов на – т.е. за счет работы электрических сил. Напомним, что в электротехнике за положительное направление тока принято считать движение условно положительных зарядов, так сложилось исторически, поскольку элементарные носители заряда – электроны были открыты, когда электричество уже широко использовалось в технике. В те времена считалось, что ток – это течение особого «электрического флюида (жидкости)».

Для протекания постоянного тока в замкнутой цепи – «кругового» движения зарядов, требуется перемещать их внутри источника тока от «-» к «+» - против направления действия сил электрического поля, все равно что перемещать жидкость снизу вверх. Против сил электрического поля заряды могут перемещать только силы **неэлектростатического** происхождения – сторонние силы (в батарееке это - силы химического происхождения, в генераторе на электростанции – электромагнитного). Благодаря постоянной работе сторонних сил на концах внешней цепи, подключенной к зажимам источника тока, поддерживается постоянная разность потенциалов, и в замкнутой цепи течет постоянный ток.

Работа сторонних сил по перемещению единичного положительного заряда вдоль замкнутой цепи (или от «-» к «+» источника тока) называется электродвижущей силой (ЭДС):

$$\varepsilon = A_{\text{сторонних}} / q, \text{ Вольт, В.} \quad (1)$$

Внутреннее сопротивление «r» источника тока характеризует бесполезные энергетические потери **внутри** источника и зависит от сопротивления электролита в химическом источнике, сопротивления обмотки якоря динамомашин и т.д.

Сопротивление нагрузки R_H – это общее сопротивление всех потребителей электротока (например, лампочек, нагревателей), которых

может быть несколько, они могут быть соединены различным образом (последовательно, параллельно), но все вместе образуют **одно** общее сопротивление нагрузки.

Закон Ома для замкнутой цепи. «Сила тока I в замкнутой цепи пропорциональна ЭДС, и обратно пропорциональна полному сопротивлению цепи $(R_H + r)$ »:

$$I = \frac{\varepsilon}{R_H + r}. \quad (2)$$

Режимы работы замкнутой цепи. На схеме замкнутой цепи – рис.1 выделяют две важнейшие точки, в которых источник тока соединяется с сопротивлением нагрузки. Эти точки или, как еще говорят, «шины» называются «**положительный зажим**» и «**отрицательный зажим**» источника.

Очевидно, что напряжение на зажимах источника тока равно падению напряжения на сопротивлении нагрузки. Поэтому, с одной стороны, вольтметр на рис. 1 показывает напряжение на зажимах источника, с другой стороны – падение напряжения на сопротивлении нагрузки.

$$U = \varepsilon - I R_H. \quad (3)$$

Режим «холостого хода». Такая ситуация возникает при «обрыве нагрузки». Сопротивление нагрузки $R \rightarrow \infty$, ток $I \rightarrow 0$, вольтметр, присоединенный к зажимам источника, как следует из (3) покажет напряжение $U = \varepsilon$. Отметим, что современные приборы – мультиметры, обладают очень большим входным сопротивлением, т.е. практически соответствуют идеальному вольтметру. Таким образом, простейший практический прием измерения ЭДС – подключить качественный мультиметр в режиме «вольтметр» к зажимам источника. Напряжение будет практически равно ЭДС.

Режим «короткого замыкания». Если $R = 0$, то это аварийный режим короткого замыкания. Напряжение при нагрузке и на зажимах источника равно нулю, в цепи протекает ток короткого замыкания, равный $I_{кз} = \frac{\varepsilon}{r}$.

Рабочий режим «под нагрузкой». Назначение цепей постоянного тока – передача заданной мощности электротока от источника – генератора к нагрузке – потребителю. Различают:

Полная мощность $P_{полн}$ – вся мощность, генерируемая источником ЭДС. Определяется формулой

$$P_{полн} = I \times \varepsilon. \quad (4)$$

Полезная мощность в нагрузке $P_{полез}$ – мощность, потребляемая нагрузкой, выделяется на сопротивлении внешней нагрузки R_H , определяется формулой

$$P_{\text{ПОЛЕЗ}} = I^2 R_H. \quad (5)$$

Теряемая мощность $P_{\text{ТЕР}}$ – мощность, выделяющаяся на внутреннем сопротивлении источника тока, рассчитывается по формуле

$$P_{\text{ТЕР}} = I^2 r. \quad (6)$$

Условие баланса мощности. При передаче энергии от источника к потребителю должно выполняться очевидное соотношение:

$$P_{\text{ПОЛНАЯ}} = P_{\text{ПОЛЕЗНАЯ}} + P_{\text{ТЕРЯЕМАЯ}}, \quad (7)$$

$$I \times \varepsilon = I^2 R_H + I^2 r. \quad (7a)$$

Условие согласования источника и нагрузки. Исследуем, при каком сопротивлении нагрузки R_H в ней выделяется наибольшая полезная мощность $P_{\text{ПОЛЕЗ}}$.

Первоначально определим, при каком токе I полезная мощность максимальна. Для этого запишем условие баланса мощности, выразим все величины через ток I и внутреннее сопротивление источника r , возьмем производную от мощности по току и приравняем к нулю – обычное исследование функции на экстремум:

$$P_{\text{ПОЛЕЗ}} = P_{\text{ПОЛН}} - P_{\text{ТЕР}} = I\varepsilon - I^2 r;$$

$$P_{\text{ПОЛЕЗ}} = (I\varepsilon - I^2 r)' = \varepsilon - 2Ir = 0 \text{ – выразим значение тока } I:$$

$I = \frac{\varepsilon}{2r}$ – это значение тока, при котором полезная мощность $P_{\text{ПОЛЕЗ}}$ максимальна. Сравним с формулой (2) закона Ома для замкнутой цепи: $\frac{\varepsilon}{2r} = \frac{\varepsilon}{R_H + r}$ – это соотношение выполняется, если

$$R_H = r. \quad (8)$$

Полезная мощность максимальна, когда сопротивление внешней нагрузки R_H равно внутреннему сопротивлению r источника тока.

Величина полезной мощности $P_{\text{ПОЛЕЗ}}$ при условии наилучшего согласования равна теряемой мощности $P_{\text{ТЕР}}$: $P_{\text{ТЕР}} = P_{\text{ПОЛЕЗ}} = \left[\frac{\varepsilon}{R_H + r} \right]^2 \times R_H = \frac{\varepsilon^2}{4r}$.

Следует понять и запомнить, что выведенное здесь условие согласования источника и нагрузки имеет весьма общий характер. Оно справедливо для цепей постоянного и переменного тока, для цепей с

сосредоточенными и распределенными параметрами, для вещественных и комплексных сопротивлений.

КПД источника:

$$\eta = \frac{P_{\text{ПОЛЕЗНАЯ}}}{P_{\text{ПОЛНАЯ}}} = \frac{P_{\text{ПОЛЕЗ}}}{P_{\text{ПОЛЕЗ}} + P_{\text{ТЕР}}} = \frac{I^2 R_H}{I^2 R_H + I^2 r} = \frac{R_H}{R_H + r} \quad (9)$$

Из (9) видно, что КПД при условии согласования источника нагрузки составляет $\eta = 50 \%$. При условии $R_H > r$, КПД увеличивается, $\eta > 50 \%$. При условии $R_H < r$, КПД уменьшается, $\eta < 50 \%$.

Разряд и заряд аккумулятора. В практической деятельности всякому инженеру приходится сталкиваться с аккумуляторами – источниками тока, в которых при разряде химическая энергия преобразуется в электрическую, а при заряде – наоборот – электрическая энергия от внешнего источника (зарядного устройства) преобразуется в химическую. К сожалению, процесс преобразования энергии из одного вида в другой происходит не мгновенно, а постепенно, и характеризуется некоторой постоянной времени заряда. Для обычных аккумуляторов эта постоянная примерно 24 часа. Именно такое время требуется для заряда аккумулятора обычным зарядным током. Обычный зарядный ток принимается равным 0,1 от емкости аккумулятора, выраженной в ампер-часах. Быстрый заряд, большим током, приводит к существенному нарушению термодинамического равновесия в электролите и вреден для аккумулятора, сокращает срок его службы.

Если аккумулятор не подключен к нагрузке, он все равно будет постепенно разряжаться малым собственным током разряда, протекающим через электролит вследствие его химического загрязнения. Чем «грязнее» электролит, тем больше собственный ток разряда. Кроме загрязнения электролита, с течением времени, происходят и деструктивные химические процессы в самих электродах. Эти процессы приводят к уменьшению «полезной» площади электродов – уменьшению площади контакта между электролитом и электродами. Внутреннее сопротивление аккумулятора возрастает.

Математическое моделирование нагрузочных кривых. Математическое моделирование (математический эксперимент) является в настоящее время неотъемлемой частью экспериментальной физики, и предваряет физический эксперимент. Особенность математического эксперимента в том, что он недорог, быстр, не требует сложных физических

приборов, проводится в строго контролируемых условиях, без помех и погрешностей.

Нагрузочные кривые – это зависимости полной, полезной, теряемой мощности и КПД от сопротивления нагрузки или тока: $P_{ПОЛЕЗ}=f(R_H)$, $P_{ПОЛН}=f(R_H)$, $P_{ТЕР}=f(R_H)$, $\eta=f(R_H)$, $P_{ПОЛЕЗ}=f(I)$, $P_{ПОЛН}=f(I)$, $P_{ТЕР}=f(I)$, $\eta=f(I)$.

На рис. 2 и рис. 3 приведены результаты расчетов, выполненные по формулам

$$P_{ПОЛЕЗ}=\left[\frac{\varepsilon}{R_H+r}\right]^2 \cdot R_H; \quad P_{ТЕР}=\left[\frac{\varepsilon}{R_H+r}\right]^2 \cdot r; \quad P_{ПОЛН}=\left[\frac{\varepsilon}{R_H+r}\right]^2 \cdot (R_H+r);$$

$$P_{ПОЛЕЗ}=I\varepsilon - I^2r; \quad P_{ПОЛН}=I\varepsilon; \quad P_{ТЕР}=I^2r.$$

Графики представлены в нормированном виде. По горизонтали – отношение сопротивления нагрузки к внутреннему сопротивлению источника R_H/r , по вертикали – отношение мощностей к максимальной мощности короткого замыкания $P_0=\varepsilon^2/r$.

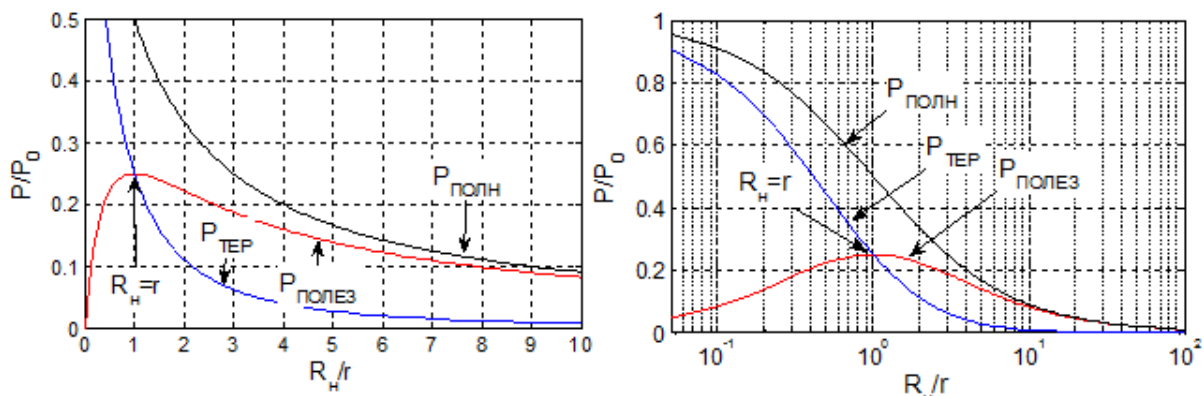


Рисунок 2 – Зависимости полезной, теряемой и полной мощности от сопротивления нагрузки. Левая панель – линейные координаты, правая панель – полулогарифмические координаты

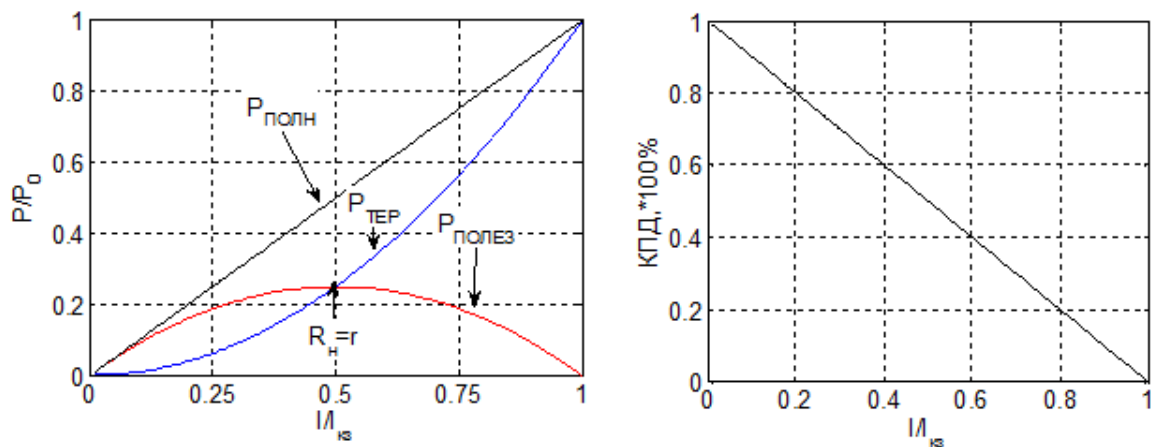


Рисунок 3 – Зависимости полезной, теряемой, полной мощности и КПД от тока

4. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

1. Макетная плата с соединениями.
2. Источник тока.
3. Мультиметры.
4. Магазин сопротивлений.

5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

5.1 Проверка основного уравнения динамики вращательного движения при постоянном моменте инерции

Схема макетной платы, представленная на лицевой панели, практически совпадает с рис. 1, за исключением ключа К, предназначенного для кратковременного подключения нагрузки, во избежание нагрева.

1. Подключите мультиметры к соответствующим контактам и приведите их в рабочее состояние. Один из мультиметров измеряет напряжение, предел – 20 В, другой – ток – предел до 100 мА (определяется индивидуально).

2. Подключите источник, соблюдая полярность и магазин сопротивлений. На магазине сопротивлений установите 20 Ом.

3. Определите ЭДС источника в режиме холостого хода. Кратковременно замыкая ключ, определите ток и напряжение, занесите в табл. 1.

4. Уменьшая сопротивление с шагом 1 Ом, повторите действия п.п.3-4 до минимального сопротивления, равного 1 Ом.

Таблица 1

ЭДС источника $\varepsilon =$

1	2	3	4	5	6	7	8
№	U, В	I, <u>мА</u>	$R_H = U/I,$ Ом	$P_{ПОЛЕЗ} =$ $U \cdot I,$ мВт	$P_{ТЕР} =$ $I^2 r$	$P_{ПОЛН} =$ $I \varepsilon$	$\eta = \frac{P_{ПОЛЕЗНАЯ}}{P_{ПОЛНАЯ}}$
1							
...							
20							

5. Рассчитайте сопротивление нагрузки, $R_H = U/I$, или запишите его, считывая непосредственно со шкалы магазина сопротивлений (колонка 4, табл. 1). Рассчитайте полезную мощность $P_{ПОЛЕЗ} = U \cdot I$ (колонка 5).

6. Постройте график зависимости полезной мощности от сопротивления нагрузки и график зависимости полезной мощности от тока.

Масштаб надо выбрать аналогично рис. 2 и рис. 3, только по горизонтали не относительное, а абсолютное сопротивление, Ом. По графику $P_{ПОЛЕЗ}=f(R_N)$ определите внутреннее сопротивление источника. Это будет точка, соответствующая максимуму полезной мощности.

7. Зная теперь внутреннее сопротивление источника, рассчитайте теряемую, полную мощности и КПД (колонка 6, 7, 8).

8. Постройте графики зависимости теряемой и полной мощности от сопротивления нагрузки и от тока и график зависимости КПД от тока.

9. Используя программу, выполните п.п.5-8 в электронном виде.

10. Сделайте выводы по работе.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое электродвижущая сила источника тока?
2. Что такое внутреннее сопротивление источника тока?
3. Запишите закон Ома для замкнутой цепи.
4. Какие существуют режимы работы замкнутой цепи?
5. При каком сопротивлении нагрузки в ней выделяется наибольшая полезная мощность?

Приложение. Программа на языке MATLAB для вычисления и построения нагрузочных кривых

```
%Эта программа построения нагрузочных характеристик
%Задание входных параметров
EDS=2;% Задание ЭДС
r=2;% Задание внутреннего сопротивления
Ikz=EDS/r;% Ток короткого замыкания
P0=EDS^2/r;% Нормировочная мощность
Rn=[0:.1:100*r];% Массив сопротивлений нагрузки
I=EDS./(Rn+r);% Соответствующий массив токов
Ppolezn=(EDS./(Rn+r)).^2.*Rn;% Полезная мощность
Pter=(EDS./(Rn+r)).^2.*r;% Теряемая
Ppoln=(EDS./(Rn+r)).^2.*(Rn+r);% Полная
%Построение графика 1
figure(1);hold on;
plot(Rn./r,Ppolezn/P0,'r','LineWidth',2);
plot(Rn./r,Pter/P0,'b','LineWidth',2);
plot(Rn./r,Ppoln/P0,'k','LineWidth',2);
grid on;xlabel('R_н/r');ylabel('P/P_0');
%*****
Ppolezn=I.*EDS-I.^2.*r;
Pter=I.^2.*r;
Ppoln=I.*EDS;
KPD=Ppolezn./Ppoln;
%Построение графика 2
figure(2);hold on;
plot(I./Ikz,Ppolezn/P0,'r','LineWidth',2);
plot(I./Ikz,Pter/P0,'b','LineWidth',2);
plot(I./Ikz,Ppoln/P0,'k','LineWidth',2);
grid on;xlabel('I/I_кз');ylabel('P/P_0');
%Построение графика 3
figure(3);hold on;
plot(I./Ikz,KPD,'k','LineWidth',2);
grid on;xlabel('I/I_кз');ylabel('КПД, *100%');
```

**ИЗУЧЕНИЕ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СООТНОШЕНИЙ
И РЕЖИМОВ РАБОТЫ
НЕОДНОРОДНОЙ ЗАМКНУТОЙ ЦЕПИ**

Учебно-методическое пособие

*Составители: Лисютин Виктор Александрович,
Лучин Владимир Леонидович*

В авторской редакции

Изд. № 30/2020. Объем 0,75 п.л.
РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»