

УСИЛИТЕЛЬ МОЩНОСТИ НА ПОЛЕВОМ ТРАНЗИСТОРЕ

СОКРАЩЕНИЯ

- АГ – автогенератор
- АЭ – активный элемент
- ИП – источник питания
- КПД – коэффициент полезного действия
- НР – недонапряжённый режим
- ПР – перенапряжённый режим
- ПТ – полевой транзистор
- ЦС – цепь связи
- УМ – усилитель мощности

ОБОЗНАЧЕНИЯ

- $a_{\sim}(t)$ – временная зависимость $a(t)$ без постоянной составляющей
- E' – напряжение отсечки
- $E_{зи}$ – напряжение смещения полевого транзистора (постоянное напряжение затвор-исток)
- $E_{п}$ – напряжение питания
- f_0 – циклическая частота возбуждаемых колебаний (частота первой гармоники)
- i_c – мгновенное значение тока стока
- $i_{c_{max}}$ – максимальное значение тока стока в импульсе
- I_{c0} – постоянная составляющая тока стока
- I_{c1} – амплитуда первой гармоники тока стока
- $P_{ип}$ – мощность, потребляемая от источника питания
- P_n – мощность, передаваемая в нагрузку
- S – крутизна управления током АЭ
- $u_{зи}$ – мгновенное значение напряжения затвор-исток
- $u_{си}$ – мгновенное значение напряжения сток-исток
- $U_{зи}$ – амплитуда напряжения возбуждения (напряжение приложено между затвором и истоком)
- $z_1 = r_1 + jx_1$ – приведённый импеданс, измеренный на частоте первой гармоники
- $z_n = r_n + jx_n$ – приведённый импеданс, измеренный на частоте п-ой гармоники
- η – коэффициент полезного действия
- ξ – коэффициент использования напряжения питания

1 Об усилителях мощности

1.1 Основные сведения

Одним из сомножителей в уравнении радиосвязи является мощность, излучаемая передающей антенной. Поэтому получение заданных уровней мощности радиочастотных колебаний является одной из важных задач радиотехники. Эта задача встречается не только в радиотехнических системах. Значительные уровни колебательной мощности требуются также и для СВЧ-нагрева, медицинских и научных исследований и проч.

Наиболее распространённым способом получения необходимой мощности радиосвязи является использование усилителя мощности (УМ) – четырёхполюсного устройства, которое при подключении источника колебаний с частотой f_0 к одной паре контактов УМ («входу УМ») обеспечивает выделение мощности в цепи, подключённой к другой паре его контактов («выходу УМ»). Цепь, подключённую к выходу УМ, обычно называют *нагрузкой* УМ, и обозначают передаваемую в эту цепь мощность соответственно: P_n . Роль нагрузки могут выполнять различные устройства: антенна, вход следующего каскада и прочее. Единственным условием, которое обязательно характеризует двухполюсник «нагрузка», является наличие импеданса с положительной действительной частью на частоте возбуждаемых колебаний f_0 : $z_n = r_n + jx_n$. Чаще всего по условиям задачи этот импеданс имеет нулевую мнимую часть, поэтому здесь и далее полагается $z_n = r_n + j0$.

Само название «усилитель мощности» – это перевод английского термина *power amplifier*. Этот термин неудачен, поскольку сосредоточивает внимание на характеристике УМ, имеющей второстепенную роль, а именно на коэффициенте *усиления* мощности. Возникает впечатление, что лучше будет тот УМ, который «лучше усиливает», то есть имеет больший коэффициент усиления мощности. В действительности же это не так. Усилением часто жертвуют, чтобы максимизировать другую, по-настоящему важную характеристику УМ – *коэффициент полезного действия* (КПД). КПД (обозначаемый η) – это доля мощности, потребляемой от источника питания, $P_{ин}$, которая отдаётся в нагрузку:

$$\eta = \frac{P_n}{P_{ин}}. \quad (1)$$

В советской терминологии вместо УМ использовалось понятие «генератор с внешним возбуждением». Здесь подавлен акцент на передаточные свойства УМ, и на первый план выходит слово «генератор» и его ассоциативная связь с выработкой энергии, а следовательно, и с эффективностью передачи этой энергии от источника в нагрузку, то есть – КПД.

Для осуществления перечисленных выше задач УМ строится так, что в нём можно выделить три характерные части схемы: активный элемент, цепь питания и цепь связи с нагрузкой (Рисунок 1). (Здесь и далее на схемах используется символ **ЗЕМЛЯ** (\perp). Он обозначает узел схемы с потенциалом 0, и все напряжения отсчитываются от земли. Благодаря ему удаётся устранить множество очевидных соединений и тем самым добиться лаконичного выражения особенностей схемы. Например, все три блока на рисунке 1 являются четырёхполюсниками. Но у двух пар контактов каждого четырёхполюсника один контакт – общий. Более того, этот контакт также является общим для всех трёх четырёхполюсников. Строгое исполнение схемы потребовало бы начертания проводов между шестью точками. Вместо этого использованы три символа \perp , и показаны только существенные соединения между цепями. **Примечание.** *Поскольку земля – это точка схемы, выражение «ток стекает в землю» бессмысленно. Ток всегда протекает по замкнутому контуру.*)

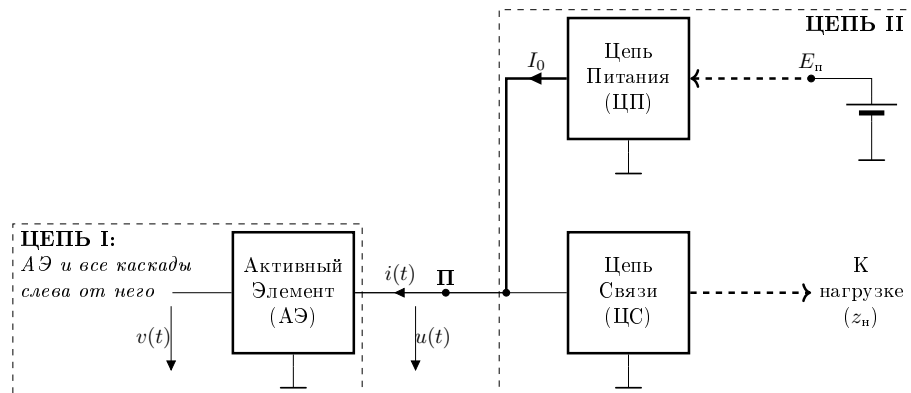


Рисунок 1 – Подключение трёхполюсного АЭ к нагрузке с помощью цепи связи

1.2 Трёхполюсные активные элементы в усилителях мощности

В состав УМ обязательно входит хотя бы один активный элемент (АЭ) – такое устройство, которое при определённых условиях может быть представлено на эквивалентной электрической схеме так, что из соответствующего участка цепи может поступать мощность в другие части схемы. Наиболее распространённым АЭ является трёхполюсный АЭ (любой транзистор может служить его примером), который на эквивалентной электрической схеме может описываться управляемым источником тока (Рисунок 2).

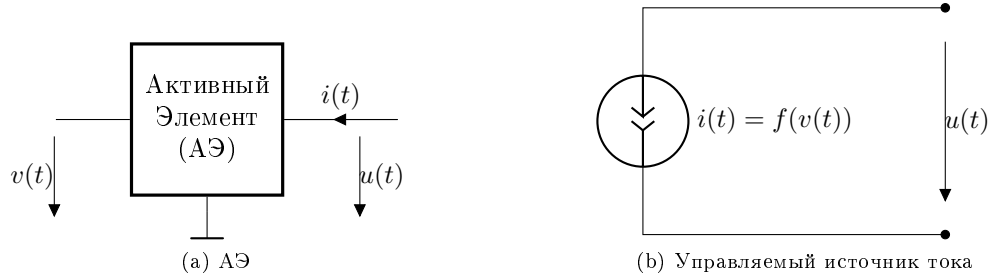


Рисунок 2 – Трёхполюсный АЭ используется в УМ как управляемый источник тока

В теории УМ на трехполюсном АЭ принято идеализировать вольт-амперные характеристики (ВАХ) таким образом, что область идеального управляемого генератора тока ограничена *линией критического режима* (прямой $u = ir_{кр}$ на рисунке 3). Пока формы токов и напряжений АЭ таковы, что все их значения лежат в области источника тока, режим работы УМ называют *недонапряжённым режимом* (НР).

Если зафиксировать все цепи и их параметры слева от АЭ, то этим однозначно определится закон управления током $v(t)$, и следовательно, для цепи, подключённой к АЭ справа, он будет представлять собой источник тока, изменяющегося по закону $i(t) = f(v(t))$. Поскольку рассматривается состояние цепи в установившемся режиме, то $i(t)$ будет периодической функцией с периодом $T = \frac{1}{f_0}$, которую можно представить рядом Фурье:

$$i(t) = I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} I_n \cos(n\omega_0 t + \varphi_n), \quad (2)$$

где I_0 – постоянная составляющая тока АЭ, $I_n \cos(n\omega_0 t + \varphi_n)$ – n -ая гармоника тока АЭ, I_n и φ_n – амплитуда и фаза n -ой гармоники тока АЭ соответственно.

Напряжение $u(t)$ представляется рядом Фурье:

$$u(t) = U_0 + \sum_{n=1}^{\infty} U_n \cos(n\omega_0 t + \psi_n), \quad (3)$$

где U_0 – постоянная составляющая напряжения АЭ, $U_n \cos(n\omega_0 t + \psi_n)$ – n -ая гармоника напряжения АЭ, U_n и ψ_n – амплитуда и фаза n -ой гармоники напряжения АЭ соответственно.

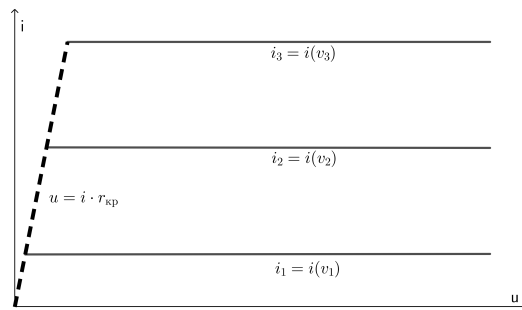


Рисунок 3 – Идеализированные вольт-амперные характеристики трёхполюсного АЭ

1.3 Цепь питания

Цепь питания (ЦП) необходима для того, чтобы подвести энергию от источника питания к УМ. Она строится так, чтобы $U_0 = E_{\text{п}}$. Один вывод источника питания подключён к земле.

Элементы ЦП выбираются так, чтобы её включение не оказывало заметного влияния на первую и высшие гармоники $u(t)$. Единственной составляющей тока, протекающей через ЦП и требующей учёта, является постоянная составляющая I_0 .

1.4 Цепь связи с нагрузкой (1)

Цепь связи (ЦС) строится так, чтобы вносить минимум потерь на частоте первой гармоники. Поэтому она выполняется из реактивных элементов. В большинстве случаев входной импеданс ЦС на частотах высших гармоник ($n \geq 2$) оказывается реактивным, что эквивалентно $\varphi_n - \psi_n = \pm \frac{\pi}{2}$. Поэтому не происходит выделения мощности, вызванных колебаниями на этих частотах.

Также ЦС должна быть развязана по постоянному току с нагрузкой.

1.5 Баланс мощностей

При допущениях, описанных выше, средняя мощность, рассеиваемая в АЭ за период колебаний, равна

$$\frac{1}{T} \int_0^T i(t) u(t) dt = I_0 E_{\text{п}} - \frac{1}{2} I_1 U_1.$$

В этом уравнении справа стоит разность двух величин. Первая – это мощность, потребляемая от источника питания

$$P_{\text{ип}} = I_0 E_{\text{п}}. \quad (4)$$

Вторая – отрицательна и показывает ту часть $P_{\text{ип}}$, которая *не* рассеивается в АЭ. Но то, что не рассеялось в АЭ, может рассеяться только в элементах, описываемых на эквивалентной схеме импедансом с *положительной действительной* частью. И поскольку ЦС состоит только из реактивных (нерассеивающих энергию) элементов, то из $P_{\text{ип}}$ вычитается мощность, отдаваемая в нагрузку,

$$P_{\text{н}} = \frac{1}{2} I_1 U_1. \quad (5)$$

1.6 Цепь связи с нагрузкой (2)

Пусть $z_1 = r_1 + jx_1$ – импеданс между точкой **П** и землёй, измеренный на частоте первой гармоники в направлении нагрузки (Рисунок 1). Из сказанного выше вытекает, что $r_1 > 0$. Тогда

$$P_{\text{н}} = \frac{1}{2} I_1^2 r_1. \quad (6)$$

Рассмотрение формулы (6) показывает основное назначение ЦС в УМ: **трансформировать $z_{\text{н}}$ так, чтобы обеспечивалась заданная величина $P_{\text{н}}$** . Значение $z_{\text{н}}$ на практике задаётся до выбора АЭ и в общем случае не годится для обеспечения требуемого режима работы УМ. Поэтому необходимо использование ЦС, которая трансформирует $z_{\text{н}}$ и *приводит* его к нужному значению. Отсюда другое название для z_1 – *приведённый* импеданс. Передача мощности в нагрузку сводится к простой эквивалентной схеме, изображённой на рисунке 4. Вся ЦЕПЬ I (см. рисунок 1) заменяется источником тока \dot{I}_1 . Вся ЦЕПЬ II (см. рисунок 1) заменяется импедансом z_1 .

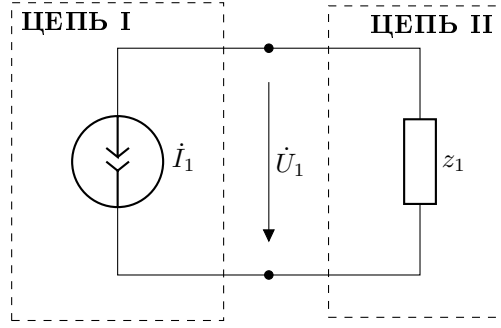


Рисунок 4 – Эквивалентная схема тракта, содержащего УМ на трёхполюсном АЭ, по первой гармонике ($\dot{I}_1 = I_1 e^{j\varphi_1}$, $\dot{U}_1 = U_1 e^{j\psi_1}$)

1.7 Приближённый расчёт усилителя мощности

При упрощённом рассмотрении УМ высшие гармоники ($n \geq 2$) не участвуют в балансе мощностей, поэтому в приближённом расчёте УМ предполагается, что $U_n = 0$ при $n \geq 2$ и $\varphi_1 - \psi_1 = 0$. Последнее условие эквивалентно $z_1 = r_1 + j0$.

Подстановка (4) и (5) в (1) даёт

$$\eta = \frac{1}{2} \frac{I_1}{I_0} \frac{U_1}{E_{\pi}}.$$

Это выражение состоит из произведения трёх сомножителей, из которых регулировке доступны только два последних. Эти два сомножителя при проектировании УМ с высоким КПД должны быть максимизированы.

Сомножитель $\frac{I_1}{I_0}$ называется *коэффициентом формы*, и он однозначно определён, когда задана функция $i(t)$. В стандартной теории УМ предполагаются следующие допущения:

- управляющее воздействие $v(t)$ имеет *синусоидальную* форму;
- *кусочно-линейная* функция управления источником:

$$i = f(v) = \begin{cases} 0, & v < E', \\ S(v - E'), & v \geq E', \end{cases}$$

где S – крутизна характеристики, E' – напряжение отсечки.

При этом для нахождения I_0 и I_1 можно пользоваться коэффициентами разложения косинусоидального импульса α_n (см. следующий пункт).

Сомножитель $\frac{U_1}{E_{\pi}}$ называется *коэффициентом использования напряжения питания* и обозначается ξ . При заданном E_{π} увеличение ξ достигается за счёт увеличения U_1 , а следовательно, за счёт увеличения r_1 . Но в конце концов точка (u, i) попадёт на линию критического режима, и описание АЭ как источника при дальнейшем увеличении U_1 станет неверным. При этом получается максимальное значение U_1 , возможное в НР, а соответствующие значения ξ и η получают индекс «кр». Поэтому для максимального КПД в НР имеем

$$\eta_{кр} = \frac{1}{2} \frac{I_1}{I_0} \xi_{кр}. \quad (7)$$

Для расчёта $\xi_{кр}$ используется формулы, выведенная для модели АЭ, описываемой идеализированными ВАХ (см. рисунок 3).

$$\xi_{кр} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{1 - 8 \frac{P_{н} r_{кр}}{\alpha_1 E_{\pi}^2}}. \quad (8)$$

Стоит отметить, что в литературе вместо сомножителя $r_{кр}$ используется $S_{кр}^{-1}$ (см. например, Сафин А.Р., Удалов Н.Н. Транзисторные усилители мощности. Сборник задач: учебное пособие. – М.: Издательство МЭИ, 2018. – 65 с.). Но такое обозначение часто вызывает ложную ассоциацию этой величины с крутизной характеристики управления током АЭ S . Эти величины не имеют ничего общего. Подробный вывод (8) можно найти в Евтянов С. И. Ламповые генераторы. М.: Связь, 1967, с.65-66.

При увеличении U_1 выше значения $\xi_{кр} E_n$ в течении части периода напряжение $u(t)$ будет попадать на линию критического режима. При этом говорят, что УМ работает в *перенапряжённом* режиме (ПР). В ПР линейный рост P_n в зависимости r_1 , предсказываемый (6), резко замедляется и затем сменяется убыванием.

Следует помнить, что реальные выходные ВАХ не имеют резкого излома. Во-первых, отсюда следует, что в действительности граница между НР и ПР – расплывчатая. Во-вторых, что (8) даст завышенное значение $\xi_{кр}$. В-третьих, что понятие критического режима существует только на бумаге.

1.8 Влияние высших гармонических на достижение критического режима

Следует помнить, что (8) получена в предположении, что $U_n = 0$ при $n \geq 2$. Если это не так, то мгновенное значение $u(t)$ может достигнуть линию критического режима при r_1 меньше того, что получается при одногармоническом расчёте (Рисунок 5). В этом случае заданное значение P_n не удастся достигнуть.

Форма напряжения при учёте различного числа гармоник

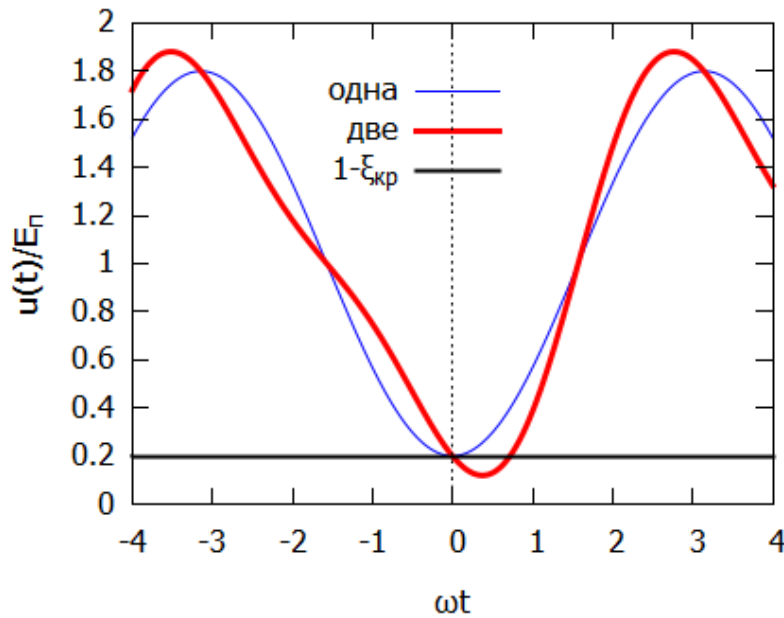


Рисунок 5 – Формы $u(t)$ при учёте различного числа гармоник: $\frac{U_1}{E_n} = 0,8$; $\frac{U_2}{E_n} = 0,2$; $\psi_2 = -\frac{\pi}{2}$. Также показан уровень минимального напряжения при работе в критическом режиме для одногармонического расчёта.

1.9 Классы работы усилителей мощности

По формам временных зависимостей $i(t)$ и $u(t)$ УМ на трёхполюсных АЭ делятся на классы, обозначаемые латинскими буквами. Наиболее простые классы А, В, АВ и С включают в себя УМ, у которых $i(t)$ имеет форму косинусоидальных импульсов, а $u(t)$ – синусоида. Разделение между классами проводится по углу отсечки θ :

- класс А: $\theta = 180^\circ$;
- класс В: $\theta = 90^\circ$;
- класс АВ: $90^\circ < \theta < 180^\circ$;
- класс С: $\theta < 90^\circ$.

На практике чаще всего используются и обсуждаются первые два класса. Некоторые вспомогательные величины для расчёта УМ этих классов приведены в таблице 1. Они используются для расчёта амплитуд n -ой гармоники разложения косинусоидального импульса тока в ряд Фурье:

$$I_n = \alpha_n i_{max}, \quad (9)$$

где i_{max} – максимальное мгновенное значение тока в импульсе.

Таблица 1: Некоторые величины, характеризующие режимы работы усилителей классов А и В.

Класс	θ , град	α_0	α_1	α_2
A	180	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0
B	90	$\frac{1}{\pi}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{2}{3\pi}$

Для оценки значения θ по осциллограмме удобно пользоваться *коэффициентом заполнения* последовательности импульсов – то есть отношением длительности импульса по уровню $\frac{i_{max}}{2}$ к периоду следования импульсов. Эта величина часто выражается в процентах (Рисунок 6). Английский термин для коэффициента заполнения – **Duty Cycle**.

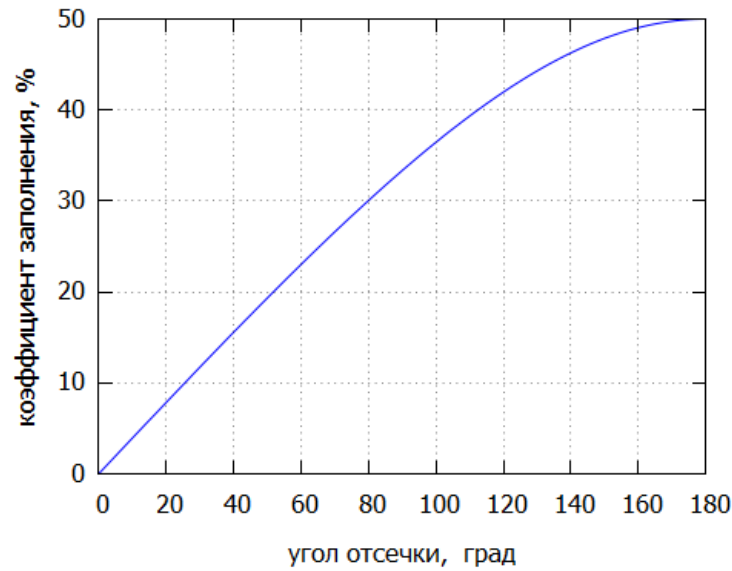


Рисунок 6 – Зависимость коэффициента заполнения от угла отсечки

2 Лабораторный стенд

2.1 Общее описание

В состав лабораторного стенда входят печатная плата макета УМ и измерительные приборы: осциллограф и мультиметр, а также блок питания и сетевой фильтр, через который осциллограф и блок питания соединяются с сетью 220 В.

Все необходимые при выполнении работы элементы находятся на верхнем слое печатной платы (Рисунок 7). Поверхность слоя разделена на прямоугольные поля. Каждое поле снабжено подписью, указывающей на функциональное назначение элементов, находящихся внутри поля. Подписи рассчитаны на предварительное знакомство с темой, внимательность и желание использовать когнитивные способности.

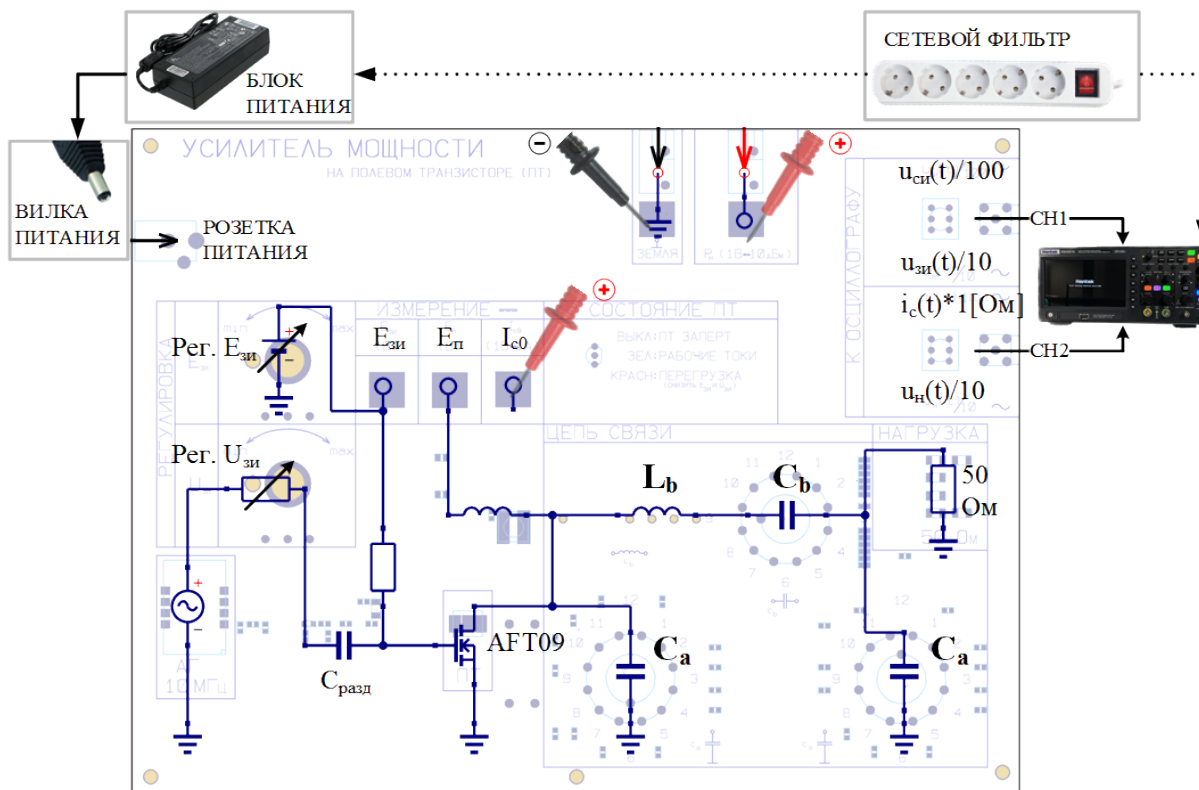


Рисунок 7 – Вид верхнего слоя печатной платы макета усилителя мощности с добавлением инфографики

Питание макета УМ осуществляется от блока питания с постоянным напряжением в диапазоне $+(12...24)$ В. Разъём для подключения блока питания находится в левом верхнем углу платы. На рисунке 7 он подписан «РАЗЪЁМ ПИТАНИЯ». Разъём питания не путать с источником питания $E_{п}$!

Физически контакт «Земля» – это значительная часть нижнего металлического слоя платы. Элементы на верхнем слое соединяются с землёй через металлизированные отверстия.

Возбуждение УМ осуществляется с помощью автогенератора (АГ) с частотой колебаний 10 МГц. Выход АГ подключён к цепи, обеспечивающей регулировку уровня возбуждения УМ.

2.2 Особенности схемы усилителя мощности

2.2.1 Активный элемент: полевой транзистор (Поле ПТ)

В качестве трёхполюсного АЭ используется n -канальный полевой транзистор (ПТ) с изолированным затвором MRF1518. Имеется следующее соответствие между обозначениями предыдущего пункта (см. рисунок 2) и теми, что являются стандартными при описании ПТ:

- $v \rightarrow u_{зи}$ (напряжение затвор-исток; англ.: V_{gs})

- $u \rightarrow u_{\text{си}}$ (напряжение сток-исток; англ.: V_{ds})
- $i \rightarrow i_c$ (ток стока; англ.: I_s)

При допущениях п. 1.7 ясно, что временная зависимость $u_{\text{зи}}(t)$ содержит только из постоянную составляющую и первую гармонику. Необходимые обозначения наглядно представлены в следующей формуле:

$$u_{\text{зи}}(t) = E_{\text{зи}} + U_{\text{зи}} \cos(\omega_0 t).$$

2.2.2 Цепь питания

ЦП выполнена из индуктивности и нескольких конденсаторов (Рисунок 8). Индуктивность выбрана так, чтобы она имела значительный модуль импеданса (по сравнению с $|z_1|$) на частоте первой гармоники. Такая индуктивность называется *дросселем* (отсюда обозначение Др на рисунке 8).

Конденсатор 100 нФ осуществляет блокировку на частоте первой и высших гармоник, тем самым развязывая УМ и ИП по высокой частоте.

Два конденсатора 10 мкФ обеспечивают стабильность напряжения питания.

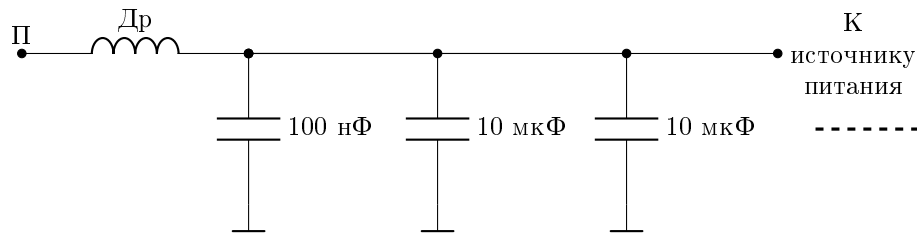


Рисунок 8 – Цепь питания УМ

2.2.3 Цепь связи с нагрузкой (Поле ЦЕПЬ СВЯЗИ)

ЦС, обеспечивающая требуемое r_1 , может быть выполнена множеством способов. Выбор конкретной её реализации обуславливается дополнительными соображениями. В макете УМ в качестве ЦС используется П-образная цепь (Рисунок 9). Эта цепь использована, потому что обладает двумя свойствами, которые выгодно использовать как на практике, так и при работе с установкой в лаборатории:

- значительная фильтрация гармоник при сравнительно небольшом количестве элементов;
- простой расчёт r_1 .

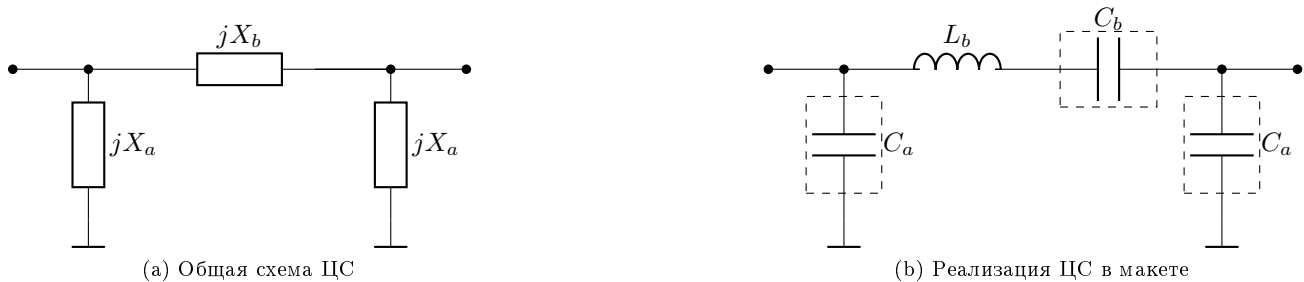


Рисунок 9 – Цепь связи с нагрузкой

В лаборатории первое свойство выгодно тем, что позволяет оценивать P_n по измерениям на осциллографе.

Второе же свойство обеспечивает простоту подготовки к работе и обработки результатов измерений. Расчёт предполагает, что все элементы ЦС – реактивные, модули реактансов на частоте f_0 равны $|X_a| = |X_b| = X$ и выбраны так, что $X_a = -X_b$. Тогда, если с одной стороны такой ЦС подключить импеданс $z_n = r_n + j0$, с другой стороны импеданс окажется $z_1 = r_1 + j0$, причём

$$r_1 = \frac{X^2}{r_{\text{н}}} \quad (10)$$

Каждый ёмкостной элемент ЦС состоит из набора конденсаторов, коммутируемых с помощью переключателя на 12 положений (Рисунок 10). Элементы ЦС рассчитаны так, чтобы каждому состоянию ЦС с одинаковыми номерами положений соответствовало действительное значение z_1 (Таблица 2). Из-за округления расчётных номиналов до значений из ряда E24, фактическое значение z_1 оказывается комплексным с небольшой мнимой частью. Индуктивность ЦС: $L_b = 0,82$ мкГн, неизменяемые части ёмкостных элементов ЦС: $C_{a0} = 330$ пФ, $C_{b0} = 430$ пФ.

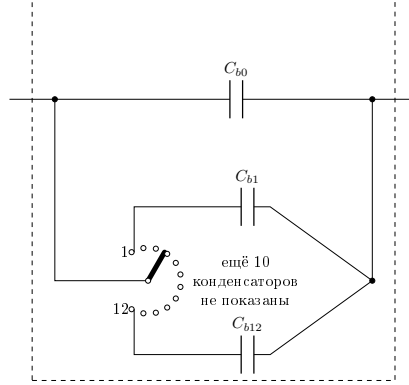


Рисунок 10 – Детализация электрической схемы ёмкостного элемента цепи связи с нагрузкой (на примере элемента C_b)

Таблица 2: Номиналы конденсаторов в цепи связи с нагрузкой

Номер положения переключателя	Номинальное значение приведённой нагрузки	$C_a = C_{a0} + C_{a_i}$			$C_b = C_{b0} + C_{b_i}$		
i	r_1 , Ом	C_{a0} , пФ	+	C_{a_i} , пФ	C_{b0} , пФ	+	C_{b_i} , пФ
1	4,3	330	+	750	430	+	0 (не впаян)
2	5,3			620			27
3	6,7			560			51
4	8,4			430			82
5	10,5			360			130
6	13,1			300			180
7	16,4			220			270
8	20,5			160			390
9	25,6			110			620
10	32			68			1000
11	40			24			1800
12	50			0 (не впаян)			12000

2.2.4 Эквивалент нагрузки (Поле НАГРУЗКА 50 Ом)

Нагрузкой УМ служит цепь из нескольких резисторов, соединённых так, чтобы обеспечить $r_n = 50 \text{ Ом}$.

2.3 Проведение измерений

2.3.1 Измерение средних значений величин ($E_{зи}$, E_n , $I_{с0}$, P_n)

Предусмотрено измерение средних значений некоторых величин с помощью мультиметра, работающего в режиме *вольтметра* (режим работы мультиметра: \overline{V}). Измеряется напряжение относительно контакта **ЗЕМЛЯ** (\perp) на металлизированной площадке с названием, соответствующим искомой величине. Для проведения измерения нужно коснуться щупом квадратной металлизированной площадки, снабжённой подписью соответствующей обозначению измеряемой величины (см. рисунок 7). Для удобства при проведении измерений предусмотрена возможность закрепления щупов мультиметра с помощью клемм.

Постоянное напряжение затвор-исток $E_{зи}$ и постоянное напряжение питания (сток-исток) E_n получают непосредственным считыванием показаний мультиметра.

Постоянная составляющая тока стока $I_{с0}$ получается заменой размерности считанного показания мультиметра на **амперы**.

Средняя мощность, выделяемая в нагрузке, P_n получается умножением на 10 показания мультиметра и имеет размерность **дБм**.

2.3.2 Измерение осциллограмм ($u_{зи\sim}(t)$, $u_{си\sim}(t)$, $u_{н\sim}(t)$, $i_{с\sim}(t)$)

Предусмотрено выведение масштабированных временных зависимостей напряжений затвор-исток $u_{зи\sim}(t)$ (масштаб 1 В:10 В) и сток-исток $u_{си\sim}(t)$ (масштаб 1 В:100 В), напряжения на нагрузке $u_{н\sim}(t)$ (масштаб 1 В:10 В) и тока стока $i_{с\sim}(t)$ (масштаб 1 В:1 А). Масштабы указаны на плате. Выведение требуемой осциллограммы осуществляется переключением тумблеров в поле **К ОСЦИЛЛОГРАФУ**. Рычаг тумблера наклонён в сторону надписи, соответствующей измеряемой осциллограмме.

2.3.3 Индикация диапазонов тока стока полевого транзистора (Поле СОСТОЯНИЕ ПТ)

В ходе работы следует обращать внимание на состояние светодиода в поле **СОСТОЯНИЕ ПТ**. Возможны три состояния:

- *нет* свечения: через полевой транзистор не протекает ток стока, необходимый для настройки усилителя в заданный режим;
- *зелёное* свечение: настройка усилителя в заданный режим возможна;
- *красное* свечение: ток стока превышает значение, необходимое для настройки усилителя в заданный режим. В этом случае следует снизить ток стока вращением ручек потенциометров $E_{зи}$ и $U_{зи}$.

3 Задание для подготовки к работе в лаборатории

3.1 Исходные данные

Требуется рассчитать УМ заданного класса на заданную мощность в нагрузке при максимальном КПД в НР, полагая характеристику управления током кусочно-линейной.

Таблица 3: Исходные данные для расчёта режима УМ

f_0 , МГц	P_n , Вт	P_n , дБм	E_n , В	θ , град	$\xi_{кр}$	S , А/В	E' , В
10	2		9				

Параметры АЭ (ПТ MRF1518): $S = 1,5$ А/В; $E' = 2,3$ В; $r_{кр} = 0,4$ Ом.

Примечание. При проведении расчётов для УМ класса В воспользоваться значениями S и E' , рассчитанными в ходе выполнения работы по УМ класса А.

Класс А: $i_{с_{max}} = 2SU_{зи}$; класс В: $i_{с_{max}} = SU_{зи}$.

3.2 Расчёт режима усилителя мощности

Рассчитать величины, характеризующие режим работы УМ в заданном классе, и внести их в таблицы 3 и 4. Для этого использовать формулы из разделов 1 и 2.

Таблица 4: Результаты расчёта режима УМ

Баланс мощностей	величина	$P_{ип}$, Вт	P_n , Вт	$\eta_{кр}$, %
	значение			
Ток стока	величина	I_{c0} , мА	I_{c1} , мА	$i_{с_{max}}$, мА
	значение			
Цепь связи (Рисунок 9)	величина	r_1 , Ом	C_a , пФ	C_b , пФ
	значение			
Вторая гармоника	величина	$ z_2 $, Ом	I_{c2} , мА	$U_{си2}$, В
	значение			

Управление током ПТ

$E_{зи} = \dots\dots\dots$ В; $U_{зи} = \dots\dots\dots$ мВ.

3.3 Содержание подготовки к работе в лаборатории

Лист с расчётными величинами, сведёнными в таблицы 3 и 4. Допускается использование дополнительных листов с пояснениями к расчёту.

Для облегчения выполнения задания в лаборатории рекомендуется иметь с собой лист с распечатанным **Заданием для выполнения в лаборатории** (см. соответствующий раздел).

4 Задание для выполнения в лаборатории: усилитель класса А

Не включая никаких устройств, проверить подключение к сети 220 В осциллографа и блока питания.

При подключённых к сети осциллографе и блоке питания измерить сопротивление между внешним контактом вилки блока питания и заземлённым контактом осциллографа с помощью мультиметра, работающего в режиме *омметра* (режим работы мультиметра: Ω) (сопротивление должно быть менее 5 Ом). В случае превышения сообщить преподавателю.

4.1 Исходное состояние

1. Поле **РЕГУЛИРОВКА**: потенциометры $E_{зи}$ и $U_{зи}$ установить в крайние левые положения.
2. Поле **ЦЕПЬ СВЯЗИ**: все переключатели установить в положения **1**.
3. Мультиметр перевести в режим *вольтметра* (режим работы мультиметра: $\overline{\overline{V}}$). В дальнейшем *все измерения* с помощью *мультиметра* проводить в этом режиме.
4. Чёрный щуп мультиметра закрепить в клемме, соединённой с контактом **ЗЕМЛЯ** (\perp).
5. Подать питание, подключив *вилку* блока питания к *розетке* в левом верхнем углу платы.
6. Соединить кабелями разъёмы на плате с входами осциллографа, как показано на рисунке 7. Включить осциллограф.

4.2 Измерение осциллограмм

1. Потенциометр $U_{зи}$ установить в среднее положение.
2. Добиться наблюдения двух-трёх периодов $u_{зи\sim}(t)$ в канале 1.
3. В разделе меню **Measure** выбрать RkPk. После этого внизу экрана будет отображаться разница между максимальным и минимальным значениями напряжения соответствующей осциллограммы. Если напряжение гармоническое, это число может быть использовано для нахождения амплитуды $U_{зи}$.
4. Сообщить $U_{зи}$ преподавателю.
5. Вращением ручки потенциометра $E_{зи}$ добиться значения I_{c0} (с точностью до 5 %), равного расчётному.
6. По осциллограммам $u_{зи\sim}(t)$ и $i_{c\sim}(t)$ вычислить $S = \dots\dots\dots \frac{A}{B}$.
7. Измерить напряжение $E_{зи}$ и I_{c0} и, пользуясь рассчитанным значением S , вычислить $E' = \dots\dots\dots B$.

4.3 Настройка усилителя мощности

1. Вращением ручек потенциометров $E_{зи}$ и $U_{зи}$ добиться расчётных значений I_{c0} и $i_{c_{max}}$ (с точностью до 5 %).
2. Выставить переключатели в поле **ЦЕПЬ СВЯЗИ** в положения, соответствующие ближайшей к расчётной приведённой нагрузке (см. таблицу 2).
3. Внести значения величин, характеризующих режим усилителя мощности, в таблицу 5 и сохранить осциллограммы (см. п. 2.3):
 - $u_{си\sim}(t)$ в файл с названием $\dots\dots\dots.csv$
 - $i_{c\sim}(t)$ в файл с названием $\dots\dots\dots.csv$

Таблица 5: Режим работы УМ при настройке на заданную мощность

$E_{зи}, В$	$U_{зи}, В$	$E_{п}, В$	$I_{c0}, мА$	$P_{н}, дБм$	$P_{н}, Вт$	$\eta, \%$

4.4 Нагрузочные характеристики

Примечание. При выполнении этого пункта *не изменять* положения ручек потенциометров $E_{зи}$ и $U_{зи}$.

1. Внести значения величин, характеризующих режим усилителя мощности, в таблицу 6 в строку, соответствующую положению переключателей из п. 4.3.
2. Внести в таблицу 6 результаты измерений, меняя положение переключателей в поле **ЦЕПЬ СВЯЗИ** от 1 до 12. *При каждом измерении мощности все переключатели должны быть в положениях с одинаковыми номерами.*
3. Внести полученные значения величин, характеризующих режим усилителя мощности, в таблицу 6 и сохранить осциллограммы (см. п. 2.3) для одного из положений, соответствующего НР:
 - $u_{си\sim}(t)$ в файл с названием _____ .csv
 - $i_{с\sim}(t)$ в файл с названием _____ .csv

и одного из положений, соответствующего ПР:

- $u_{си\sim}(t)$ в файл с названием _____ .csv
- $i_{с\sim}(t)$ в файл с названием _____ .csv

Таблица 6: Зависимость режима УМ от состояния приведённой нагрузки

Положение переключателей	$I_{с0}$, мА	P_n , дБм	P_n , Вт	η , %
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				

4.5 Завершение работы

1. Выключить осциллограф.
2. Отключить вилку блока питания от платы.
3. Выключить сетевой фильтр.

5 Задание для выполнения в лаборатории: усилитель класса В

Не включая никаких устройств, проверить подключение к сети 220 В осциллографа и блока питания.

При подключённых к сети осциллографе и блоке питания измерить сопротивление между внешним контактом *вилки* блока питания и заземлённым контактом осциллографа с помощью мультиметра, работающего в режиме *омметра* (режим работы мультиметра: Ω) (сопротивление должно быть менее 5 Ом). В случае превышения сообщить преподавателю.

5.1 Исходное состояние

1. Поле **РЕГУЛИРОВКА**: потенциометры $E_{зи}$ и $U_{зи}$ установить в крайние левые положения.
2. Поле **ЦЕПЬ СВЯЗИ**: все переключатели установить в положения **1**.
3. Мультиметр перевести в режим *вольтметра* (режим работы мультиметра: $\overline{\overline{V}}$). В дальнейшем *все измерения* с помощью *мультиметра* проводить в этом режиме.
4. Чёрный щуп мультиметра закрепить в клемме, соединённой с контактом **ЗЕМЛЯ** (\perp).
5. Подать питание, подключив *вилку* блока питания к *розетке* в левом верхнем углу платы.
6. Соединить кабелями разъёмы на плате с входами осциллографа, как показано на рисунке 7. Включить осциллограф.

5.2 Настройка усилителя мощности

1. Потенциометр $U_{зи}$ установить в крайнее правое положение.
2. Переключением соответствующего тумблера добиться наблюдения двух-трёх периодов $u_{зи\sim}(t)$ в канале 1.
3. Переключением соответствующего тумблера добиться наблюдения $i_{c\sim}(t)$ в канале 2.
4. В разделе меню **Measure** выбрать *+Duty* для канала 2.
5. Вращением ручки потенциометра « $E_{зи}$ » добиться значения *+Duty* (с точностью до 1 %) равного 33 %.
6. Выставить переключатели в поле **ЦЕПЬ СВЯЗИ** в положения, соответствующие ближайшей к расчётной приведённой нагрузке (см. таблицу 2).
7. Вращением ручки потенциометра « $U_{зи}$ » добиться заданной мощности в нагрузке (с точностью до 5 %).
8. Внести значения величин, характеризующих режим усилителя мощности, в таблицу 7 и сохранить осциллограммы (см. п. 2.3):
 - $u_{си\sim}(t)$ в файл с названием _____ .csv
 - $i_{c\sim}(t)$ в файл с названием _____ .csv

Таблица 7: Режим работы УМ при настройке на заданную мощность

$E_{зи}, В$	$U_{зи}, В$	$E_n, В$	$I_{c0}, мА$	$P_n, дБм$	$P_n, Вт$	$\eta, \%$

5.3 Нагрузочные характеристики

Примечание. При выполнении этого пункта, *не изменять* положения ручек потенциометров $E_{зи}$ и $U_{зи}$.

1. Внести значения величин, характеризующих режим усилителя мощности, в таблицу 8 в строку, соответствующую положению переключателей из п. 5.2.
2. Внести в таблицу 8 результаты измерений, меняя положение переключателей в поле **ЦЕПЬ СВЯЗИ** от 1 до 12. *При каждом измерении мощности все переключатели должны быть в положениях с одинаковыми номерами.* Порядок прохождения номеров положений не имеет значения.
3. Внести полученные значения величин, характеризующих режим усилителя мощности, в таблицу 8 и сохранить осциллограммы (см. п. 2.3) для одного из положений, соответствующего НР, :

- $u_{си\sim}(t)$ в файл с названием _____ .csv
- $i_{с\sim}(t)$ в файл с названием _____ .csv

и одного из положений, соответствующего ПР:

- $u_{си\sim}(t)$ в файл с названием _____ .csv
- $i_{с\sim}(t)$ в файл с названием _____ .csv

Таблица 8: Зависимость режима УМ от состояния приведённой нагрузки

Положение переключателей	$I_{с0}$, мА	P_n , дБм	P_n , Вт	η , %
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				

5.4 Завершение работы

1. Выключить осциллограф.
2. Отключить вилку блока питания от платы.
3. Выключить сетевой фильтр.

6 Обработка результатов измерений

Нижеследующее задание относится как к лабораторной работе по УМ класса А, так и УМ класса В. При построениях временных зависимостей учесть, что данные в csv-файле не содержат постоянную составляющую. При выполнении задания можно пользоваться файлами в папке Моделирование.

1. Построить нагрузочные характеристики $P_n[\text{Вт}]$, η и I_{c0} . (Желательно уместить все характеристики на одной странице.)
2. Сравнить в одной системе координат ожидаемые и измеренные зависимости $u_{си}(t)$, характеризующие режим работы УМ при настройке на заданную мощность.
3. Сравнить в одной системе координат ожидаемые и измеренные зависимости $i_c(t)$, характеризующие режим работы УМ при настройке на заданную мощность.
4. Построить в одной системе координат все *три* измеренные зависимости $i_c(t)$. Достаточно одного периода колебаний.
5. Найти вторую гармонику тока стока I_{c2} в НР.
6. Высказать предположения о причинах отличия результатов измерений и теории. Выполнение задания по обработке даёт необходимый для этого материал. (Также следует переосмыслить методику настройки УМ в лаборатории. Позволяет ли она *в принципе* прийти к расчётным значениям?)

Примечание. Допускаются только толкования и гипотезы, подкреплённые формулами и численными оценками. Например, упоминание погрешности, вносимой измерительным прибором, нужно обозначить символом и поместить его в уравнение, где погрешность оказывает влияние. Затем в качестве примера указать для какого-либо измерения ожидаемое численное значение предполагаемой погрешности. *В случае невозможности прийти к убедительным выводам упомянуть об этом явно.*

Примечание. Отчёт выполняется в виде файла .pdf. Сравнение измеренных и смоделированных величин проводить *в одной системе координат*. Величины, отложенные по осям графиков, описывать словами, а не буквенными обозначениями. Через запятую написать размерность.