

Задача № 304

Изучение законов переменного тока

При подготовке к выполнению этой задачи следует ознакомиться с теорией, используя пособия из списка литературы, рекомендованной по курсу, например:

1. П.К. Кашкаров, А.И. Ефимова, А.В. Зотеев, С.Н. Козлов «Курс лекций по общей физике для химических факультетов университетов» Ч. II, Гл.2, §2 (с. 266–282).
2. С.Н. Козлов, А.В. Зотеев, А.Н. Невзоров «Задачи по курсу общей физики с решениями. «Колебания и волны. Волновая оптика», М., изд. МГУ, §6 (с. 63–75)
3. И.В. Савельев «Курс физики», т.2, М. Наука, Гл. XIII «Электрические колебания».

1. Цель работы

Экспериментальное изучение вынужденных колебаний в электрических цепях; знакомство с явлениями и проверка законов переменного тока в условиях его квазистационарности.

Идея эксперимента

В эксперименте используется двухканальный осциллограф, позволяющий наглядно демонстрировать и измерять фазовые соотношения в контуре с последовательно соединёнными основными пассивными элементами цепей переменного тока – резисторами (« R »), катушками индуктивности (« L ») и конденсаторами (« C »). При проверке законов переменного тока для точных измерений эффективных значений сил токов и напряжений на отдельных участках цепи используется цифровой вольтметр.

2. Теоретическая часть

ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК

1. Квазистационарный переменный ток

Если в замкнутой электрической цепи действует переменная во времени ЭДС, то в цепи возникает переменный электрический ток. Сила переменного тока может быть разной в различных сечениях последовательно соединённых участков достаточно длинной цепи. Это обусловлено конечной скоростью передачи электрических изменений в такой цепи в результате распространения электромагнитной волны вдоль неё, которое происходит со скоростью света. Однако мгновенные значения силы тока во всех последовательно соединённых участках цепи будут практически одинаковыми, если ЭДС изменяется незначительно за время, необходимое для распространения поля в самую отдалённую точку этой цепи. Токи, удовлетворяющие такому условию, называются *квазистационарными*. Условие квазистационарности можно записать в виде $l/c \ll T$, где l – длина цепи, c – скорость света, T – период изменения ЭДС. В частности, можно считать, что ток промышленной частоты ($\nu = 50$ Гц) квазистационарен для цепей длиной менее 500 км.

В дальнейшем мы будем рассматривать только квазистационарные переменные токи, а также наиболее важный случай переменной ЭДС источника, изменяющейся по гармоническому закону вида

$$U(t) = U_0 \cdot \cos(\Omega t), \quad (1)$$

где $U(t)$ – мгновенное, а U_0 – амплитудные значения ЭДС; $\Omega = 2\pi\nu$ – циклическая частота, t – время. В равенстве (1) начало отсчёта времени выбрано так, чтобы начальная фаза ЭДС равнялась нулю.

Явления в цепях переменного тока

Явления в цепях переменного тока оказываются более сложными, чем в цепях постоянного тока. Это связано с тем, что при включении в цепь переменного тока «энергетических», то есть способных накапливать энергию, элементов в виде катушек индуктивности L и конденсаторов C (т.н. «реактивные элементы») изменения силы тока и напряжения в цепи всегда будет связано с изменением энергии, запасённой в системе. Так как изменение энергии не может происходить мгновенно, то в цепи переменного тока, содержащей реактивные элементы, будет наблюдаться запаздывание изменения силы тока или напряжения и между ними возникнет сдвиг фаз. Напомним, что величина электроёмкости вводится в электростатике как коэффициент пропорциональности между модулем заряда обкладок конденсатора q и разностью потенциалов между ними:

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2}. \quad (2)$$

Аналогично индуктивность контура (коэффициент самоиндукции) в магнитостатике определяется, как коэффициент пропорциональности между собственным магнитным потоком Φ_S через поверхность, ограниченную контуром и силой тока I , протекающего по этому контуру:

$$L = \frac{\Phi_S}{I}. \quad (3)$$

а. Участок цепи с резистором

Пусть источник ЭДС, меняющейся по закону $U(t) = U_0 \cdot \cos(\Omega t)^*$ подключен к резистору R (рис. 1,а), не обладающему индуктивностью и электроёмкостью.

Выясним прежде всего, каково фазовое соотношение между силой тока и напряжением. Запишем 2-е правило Кирхгофа для данного контура – в условиях квазистационарности оно должно выполняться для мгновенных значений силы тока и напряжений:

$$U_0 \cdot \cos \Omega t = R \cdot I_0 \cdot \cos(\Omega t - \psi_R).$$

Здесь ψ_R – предполагаемый фазовый сдвиг для участка с резистором. Но гармонические функции в левой и правой части могут быть равны **в любой момент времени** только, если $\psi_R = 0$ – т.е. фазовый сдвиг отсутствует.

Из равенства амплитудных значений получаем амплитудное значение силы тока:

$$I_0 = \frac{U_0}{R}. \quad (4)$$

В соответствии с законом Ома для участка цепи переменного тока видно, что роль полного сопротивления в данном случае выполняет привычная для нас величина омического сопротивления резистора:

$$Z_R = \frac{U_{0R}}{I_{0R}} \Rightarrow Z_R = R. \quad (5)$$

Итак, **на участке с резистором** сила переменного тока меняется по закону:

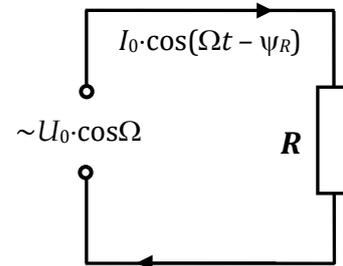


Рис. 1,а. Участок с резистором.

* Так обычно принято обозначать ЭДС источника в подобных случаях, и мы не будем нарушать традицию.

$$I_R(t) = \frac{U_0}{R} \cdot \cos \Omega t. \quad (6)$$

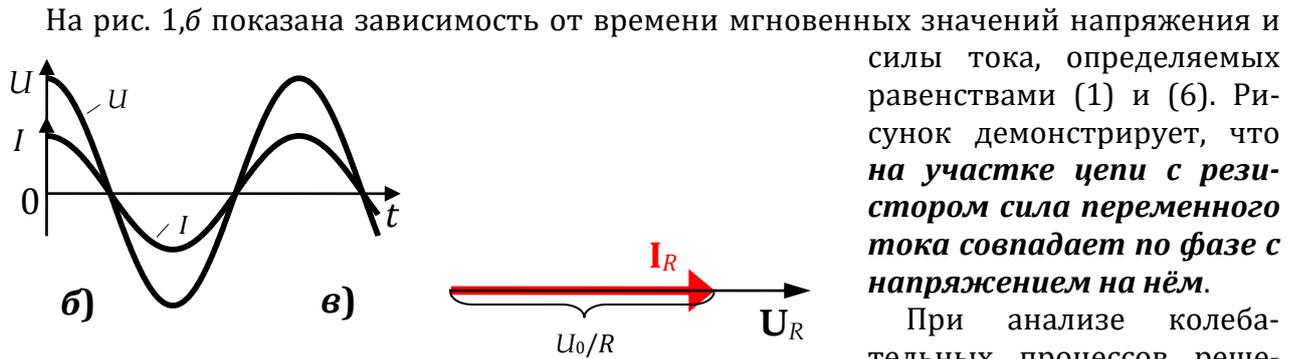


Рис. 1,б и в. Зависимости напряжения и силы тока от времени для участка цепи с резистором (б) и векторная диаграмма для него (в).

и силы тока, определяемых равенствами (1) и (6). Рисунок демонстрирует, что **на участке цепи с резистором сила переменного тока совпадает по фазе с напряжением на нём.**

При анализе колебательных процессов решение многих вопросов значительно облегчается и становится особенно

наглядным, если изображать колебания графически в виде векторов на плоскости. Полученная таким образом схема называется **векторной диаграммой**. Векторная диаграмма для колебательных процессов строится следующим образом.

Пусть колебательный процесс происходит по гармоническому закону:

$$x(t) = A \cdot \cos(\Omega t + \psi_0). \quad (7)$$

Поставим в соответствие этому колебанию вектор длины A , равной его амплитуде. Направление вектора определяет фаза колебания $(\Omega t + \psi_0)$ – такой угол «**вектор-колебание**» составляет с полярной осью X (рис. 2). С течением времени вектор поворачивается против часовой стрелки с угловой скоростью Ω , а проекция конца вектора на ось X будет изменяться в точном соответствии с законом равенства (7).

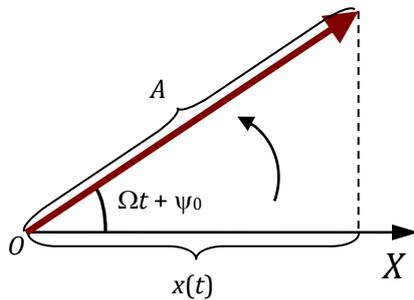


Рис. 2. Векторная диаграмма

Обычно на векторной диаграмме одновременно представлены несколько колебательных процессов. При равенстве частот этих колебаний Ω взаимное расположение векторов для разных колебаний не изменяется со временем. Тогда, определяя углы между соответствующими векторами, можно находить сдвиги фаз между этими колебаниями. Если колебания происходят в одном направлении («сонаправлены»), то их

сложение можно проводить, складывая соответствующие векторы. Амплитуда и фаза результирующего колебания определяются длиной и направлением результирующего вектора.

Векторная диаграмма для участка цепи с одним только резистором R представлена на рис. 1,в. На ней вдоль полярной оси X сначала был отложен вектор-колебание U_R , длина которого равна амплитудному значению приложенного напряжения U_0 . Поскольку сила тока в рассматриваемом случае изменяется в одной фазе («синфазно») с напряжением, вектор-колебание для силы тока I_R будет направлен так же, как и вектор U_R . Его длина по закону Ома равна U_0/R . С течением времени разность фаз колебаний $I(t)$ и $U(t)$ не меняется – пара векторов поворачивается синхронно, угол между ними остаётся равным нулю.

В заключение этого пункта заметим, что резистор в цепи переменного тока часто называют «активной нагрузкой», а его сопротивление – «активным сопротивлением». Смысл этих терминов связан с тем, что на таком участке всегда происходит необратимый переход электромагнитной энергии во внутреннюю – т.е. в тепло!

б) Участок цепи с катушкой индуктивности

Пусть теперь источник переменной ЭДС $U(t) = U_0 \cdot \cos(\Omega t)$ подключен к катушке индуктивности с пренебрежимо малым омическим сопротивлением провода, из которого она намотана (рис. 3,а).

При протекании по катушке переменного тока в ней возникает ЭДС самоиндукции, равная, по закону Фарадея:

$$\mathcal{E}_{ind} = -L \frac{dI}{dt}.$$

Так как падение потенциала в отсутствие участков с омическим сопротивлением в рассматриваемом контуре равно нулю, то по второму правилу Кирхгофа можно записать:

$$U_0 \cdot \cos(\Omega t) - L \cdot \frac{dI}{dt} = 0. \quad (8)$$

Из этого равенства легко выразить сначала производную силы тока:

$$\frac{dI}{dt} = \frac{U_0}{L} \cdot \cos(\Omega t),$$

а затем, проведя интегрирование, найти и саму силу тока:

$$I(t) = \frac{U_0}{\Omega L} \cdot \sin(\Omega t). \quad (9)$$

Для выявления фазового соотношения силы тока и напряжения удобно силу тока записать, используя ту же гармоническую функцию, что и для ЭДС – т.е. косинус:

$$I(t) = I_0 \cdot \cos(\Omega t - \pi/2). \quad (10)$$

Таким образом, **на участке с катушкой индуктивности сила тока отстаёт от напряжения по фазе на $\pi/2$** . Амплитудное значение силы тока при этом равно:

$$I_0 = \frac{U_0}{\Omega L}. \quad (11)$$

Поскольку сопротивление участка цепи переменного тока равно по определению отношению амплитудных (или действующих) значений напряжения и силы тока для участка с катушкой индуктивности ($Z_L \equiv X_L$) получаем:

$$X_L = \Omega L. \quad (12)$$

Эту величину называют *индуктивным сопротивлением*. Как видно из данного равенства, индуктивное сопротивление растёт с увеличением частоты Ω и индуктивности катушки L . Для постоянного тока ($\Omega = 0$) индуктивное сопротивление равно нулю.

На рис. 3,б показана зависимость от времени мгновенных значений силы тока $I(t)$ и напряжения $U(t)$ для участка цепи, содержащего катушку индуктивности. На рисунке

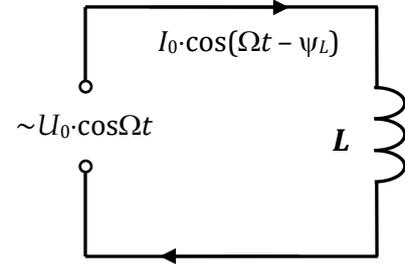


Рис. 3.а. Участок с катушкой

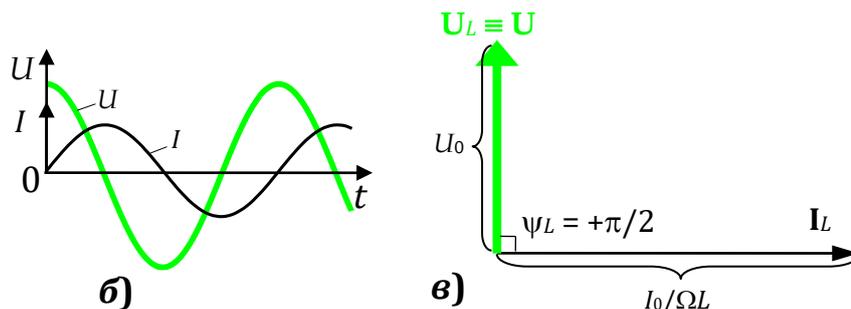


Рис. 3. Зависимости напряжения и силы тока от времени для участка цепи с катушкой индуктивности (а) и векторная диаграмма для него (б).

отражён, полученный выше результат – отставание по фазе силы тока от напряжения. Так как на векторной диаграмме изменение во времени представляется поворотом вектора против движения часовой стрелки, то отставанию силы тока от напряжения на $\pi/2$ соответствует поворот вектора-колебания силы тока I_R по отношению к вектору-колебанию напряжения U_R на угол $\pi/2$ по часовой стрелке. Если вектор I_R направить горизонтально, то векторная диаграмма для участка цепи, содержащего катушку индуктивности, примет вид, представленный на рис. 3,в.

в) Участок цепи с конденсатором

Индуктивностью и омическим сопротивлением подводящих проводов цепи, представленной на рис. 4,а будем пренебрегать. В этом случае напряжение на конденсаторе можно считать равным ЭДС источника тока:

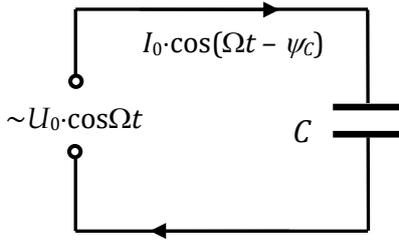


Рис. 4,а. Участок с конденсатором.

$$U_c(t) = U_0 \cdot \cos(\Omega t). \quad (1,а)$$

Тогда заряд на обкладках конденсатора будет изменяться по закону:

$$q(t) = C \cdot U_c(t) = C \cdot U_0 \cos(\Omega t). \quad (13)$$

Сила тока в цепи равна по определению скорости переноса заряда через сечение проводников, а значит производной $q(t)$ по времени. Поэтому, дифференцируя (13), находим

$$I(t) = -\Omega C \cdot U_0 \sin(\Omega t) = \Omega C U_0 \cdot \cos(\Omega t + \pi/2). \quad (14)$$

На рис. 4,б представлены зависимости мгновенных значений напряжения и силы тока в цепи, содержащей конденсатор, соответствующие равенствам (1,а) и (14) – **сила тока через конденсатор опережает по фазе напряжение на ней на $\pi/2$** . На векторной диаграмме этому опережению соответствует поворот вектора-колебания силы тока I_R по отношению к вектору-колебания напряжения U_R на угол $\pi/2$ против часовой стрелки. Если вектор I_R направить горизонтально, то векторная диаграмма для участка цепи, содержащего конденсатор, примет вид, представленный на рис. 4,в.

Как легко видеть из равенства (14) амплитудное значение силы тока равно:

$$I_0 = \Omega C U_0. \quad (15)$$

А роль сопротивления участка цепи переменного тока с конденсатором (с учётом $I_0 = U_0/X_c$) играет величина:

$$X_c = \frac{1}{\Omega C}. \quad (15)$$

Она называется ёмкостным сопротивлением. Для постоянного тока конденсатор представляет собой разрыв электрической цепи – ёмкостное сопротивление конденсатора бесконечно велико. Для переменного тока сопротивление конденсатора тем меньше, чем больше частота Ω и ёмкость C .

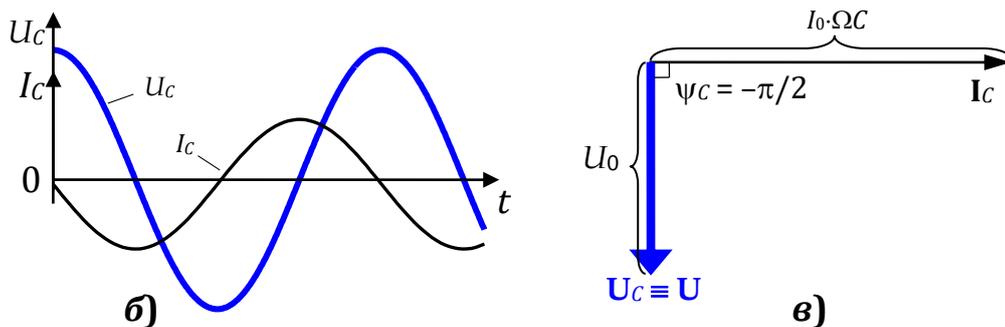


Рис. 4. Зависимости напряжения и силы тока от времени для участка цепи с конденсатором (б) и векторная диаграмма для него (в).

г) Цепь, составленная из последовательно соединенных элементов R , L и C

Рассмотрим теперь цепь, включающую в себя все проанализированные выше участки (« R », « L » и « C »), соединённые последовательно. Будем предполагать, что в составленном из этих участков контуре включён источник переменной гармонической ЭДС $U(t) = U_0 \cdot \cos(\Omega t)$, как показано на рис. 5, а.

В этом случае мгновенные значения силы тока, протекающего через все три элемента, будут одинаковыми. Чтобы построить векторную диаграмму, направим вектор-колебание силы тока I горизонтально, как показано на рис. 5, б. Его длина равна амплитудному значению силы тока в контуре I_0 .

Напряжение на резисторе по фазе совпадает с силой тока, поэтому вектор U_R , длина которого равна амплитуде напряжения на резисторе $U_{R0} = I_0 R$, направлен так же, как и вектор-колебание I .

Напряжение на катушке индуктивности, равное возникающей на ней ЭДС самоиндукции, опережает силу тока по фазе на $\pi/2$ и поэтому вектор-колебание U_L следует повернуть относительно вектора I на угол $\pi/2$ против часовой стрелки. Его длина по закону Ома для участка цепи переменного тока равна амплитуде напряжения на катушке $U_{L0} = X_L \cdot I_0 = \Omega L \cdot I_0$.

Напряжение на конденсаторе, равное разности потенциалов между его обкладками, отстает от силы тока по фазе на $\pi/2$, и поэтому вектор-колебание U_C повернут относительно вектора I на угол $\pi/2$ по часовой стрелке. Его длина равна амплитуде напряжения $U_{C0} = X_C \cdot I_0 = I_0 / (\Omega \cdot C)$. Сумма мгновенных значений напряжений $U_R(t)$, $U_L(t)$ и $U_C(t)$ в любой момент времени должна быть равна приложенному напряжению $U(t)$. На век-

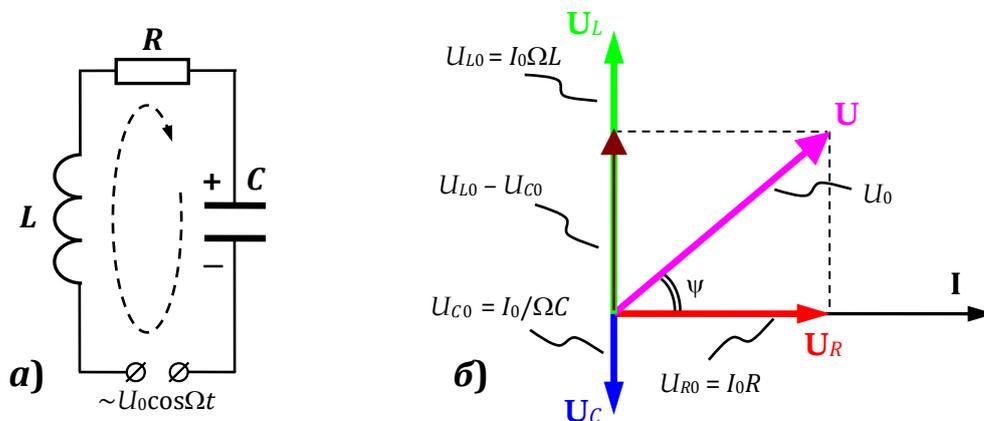


Рис. 5. Последовательный контур « RLC » с источником ЭДС (а) и векторная диаграмма для него (б).

торной диаграмме это означает, что сумма векторов-колебаний U_R , U_L и U_C должна совпасть с вектором-колебанием приложенного напряжения U (источника переменной ЭДС). Длина результирующего вектора равна амплитуде напряжения U_0 источника ЭДС. Векторная диаграмма для цепи, состоящей из последовательно соединенных элементов « R », « L » и « C », тогда примет окончательный вид, показанный на рис. 5, б.

Вектор U образует с вектором I в общем случае некоторый угол ψ , определяющий разность фаз между колебаниями приложенного напряжения $U(t)$ и силы тока $I(t)$. Из рис. 5, б видно, что

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{\Omega L - 1/\Omega C}{R}. \quad (16)$$

Также, используя теорему Пифагора для прямоугольного треугольника, гипотенуза которого равна U_0 , получаем, что

$$U_0^2 = (I_0 R)^2 + I_0^2 \left(\Omega L - \frac{1}{\Omega C} \right)^2, \quad (17)$$

откуда

$$I_0 = \frac{U_0}{\sqrt{R^2 + \left(\Omega L - \frac{1}{\Omega C} \right)^2}}. \quad (18)$$

Из последнего равенства следует, что полное сопротивление данного участка цепи переменного тока равно:

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\Omega L - \frac{1}{\Omega C} \right)^2}. \quad (19)$$

При этом величина $X = \Omega L - \frac{1}{\Omega C}$ называется «реактивным сопротивлением» такого участка цепи. Надо, однако, помнить, что эти результаты получены только для частного случая участка цепи, состоящего из последовательно соединенных резистора, катушки и конденсатора (т.н. «**RLC**-цепочка»).

Мгновенные значения напряжений и силы тока определяются равенствами:

$$U(t) = U_0 \cdot \cos(\Omega t), \quad I(t) = I_0 \cdot \cos(\Omega t - \psi). \quad (20)$$

Отметим, кроме того, что сдвиг фаз ψ между силой тока и приложенным напряжением зависит от соотношения между индуктивным X_L и ёмкостным X_C сопротивлениями цепи. Если $\Omega L > 1/(\Omega C)$ (преобладает индуктивное сопротивление), то сила тока отстаёт по фазе от напряжения. Если же $1/(\Omega C) > \Omega L$ (преобладает ёмкостное сопротивление), то сила тока опережает напряжение. При равенстве $\Omega L = 1/(\Omega C)$ сила тока и приложенное напряжение источника изменяются синфазно. На удовлетворяющей этому условию частоте $\Omega_{\text{рез}} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, называемой *резонансной*, полное сопротивление

цепи минимально и равно R . При этом падение напряжения на резисторе равно приложенному напряжению U . Напряжения на катушке индуктивности U_L и конденсаторе U_C равны по амплитуде и противоположны по фазе. При условии, что $\Omega L = 1/(\Omega C) \gg R$, амплитуда напряжений на катушке индуктивности U_{L0} и конденсаторе U_{C0} оказываются много больше амплитуды приложенного напряжения U_0 и поэтому описанное явление в электротехнике называют *резонансом напряжений*. Векторная диаграмма рассматриваемой цепи при резонансе напряжений принимает вид, показанный на рис. 5,в.

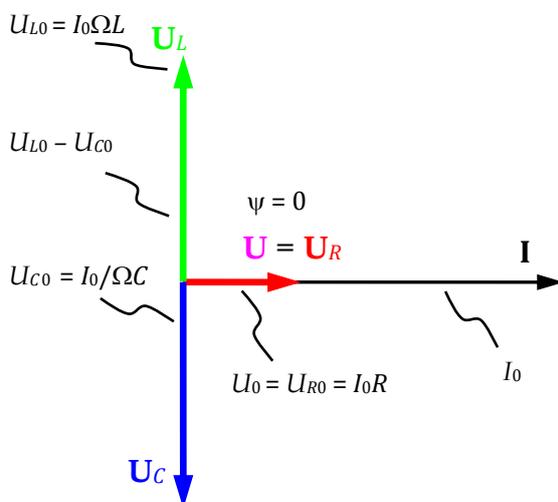


Рис. 5,в. Векторная диаграмма при резонансе в «**RLC**-контуре».

3. Экспериментальная установка

В состав установки входят следующие приборы:

- 1) плата с размещёнными на ней элементами R , L и C ;
- 2) генератор ГЗ-118,
- 3) мультиметр В7-38,
- 4) цифровой осциллограф АКПП-4119/3 или АКПП-4126/2А.

Общий вид платы для проведения измерений представлен на рис. 6.

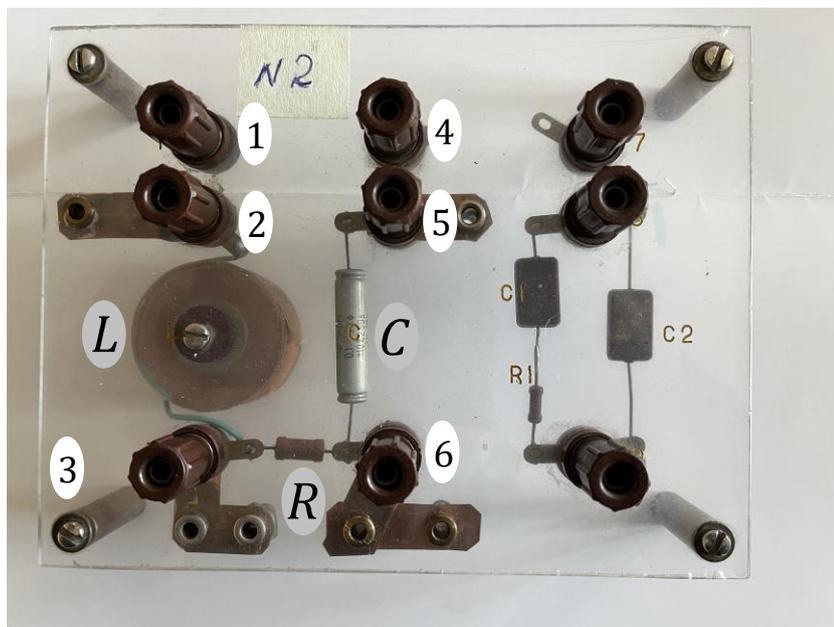


Рис. 6. Плата-макет с электрической схемой.

Буквами обозначены элементы схемы:

R – резистор; L – катушка индуктивности; C – конденсатор.

Цифрами «1, ..., 6» отмечены гнезда штекеров, для подключения к различным участкам цепи.

На рис. 7 приведена электрическая схема соединений на плате элементов R , L и C и номера контактов с гнездами штекеров, для подключения к участкам цепи.

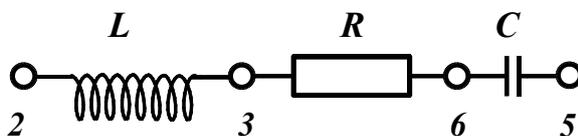


Рис. 7. Принципиальная электрическая схема участка цепи «RLC».

4. Порядок проведения работы

Упражнение 1. Измерение омических сопротивлений R и R_L

1. Подключите мультиметр В7-38 к сети ~ 220 В.
2. Выберите режим измерения сопротивления – нажмите на кнопку « $k\Omega$ ».
3. Для измерения сопротивления R_L присоедините входные провода мультиметра к гнездам «2» и «3» на плате.

4. Для измерения сопротивления резистора R присоедините провода мультиметра к гнездам «3» и «6».

5. Все результаты измерений данного упражнения запишите в стандартной форме с указанием погрешности.

6. Отключите мультиметр от платы.

Упражнение 2. Наблюдение и измерение сдвига фаз между силой тока и напряжением в цепях с элементами R , L и C

а) Сдвиг фаз между силой тока и напряжением на участке цепи с резистором и катушкой индуктивности

1. Подключите генератор к плате – длинный конец кабеля («общий контакт») к клемме «6», короткий к клемме «2».

2. Тумблером «сеть» включите генератор. После включения загорится контрольная лампа.

3. Установите мультиметр в режим измерения переменного напряжения – нажмите кнопку « $V\sim$ ». Подключите прибор к тем же гнездам «2» и «6», что и выход генератора – провод «Общий» к гнезду «6».

4. Установите частоту генератора **6000 Гц**. Регулятором напряжения (7) установите выходное напряжение генератора $U \sim 5-6$ В (измеряемое вольтметром). Затем отключите провода вольтметра от платы.

5. Подключите 1-й канал осциллографа «КАН 1» к участку цепи с резистором R : длинный конец кабеля («общий») подсоедините к гнезду «6», короткий – к гнезду «3».

6. Подключите 2-й канал осциллографа «КАН 2» к участку цепи с катушкой L и резистором R : длинный конец кабеля («общий») подсоедините к гнезду «6», короткий – к гнезду «2».



Рис. 8. Зависимости напряжения $U(t)$ и силы тока $I(t)$ на экране осциллографа.

7. С помощью осциллографа убедитесь, что на генераторе установлена частота **6000 Гц**. На экране осциллографа в правом нижнем углу высвечивается частота, на которой работает генератор.

8. С помощью регуляторов (8) и (11) осциллографа добейтесь установления на экране изображения синусоид, примерный вид которых представлен на рис. 8. С помощью регулятора развертки (14) растяните график синусоиды, так чтобы на экране помещался один период синусоиды. Вращая регуляторы (9) можно изменить амплитуду каждой синусоиды. Регулятор (10) смещает развертку по вертикали. Для правильного выполнения данной задачи смещение по вертикали для обеих осциллограмм должно быть равно нулю. Чтобы установить смещение равное нулю надо однократно нажать на ручку регулятора (10).

9. Используя изображение сигналов на экране осциллографа, измерьте сдвиг фаз ψ между колебаниями напряжений на резисторе U_R (1 канал) и на всём участке U_{RL} (2 канал). Следует отметить, что падение напряжения на резисторе $U_R(t)$ по закону Ома пропорционально силе тока $I(t)$, протекающего по участку цепи с катушкой индуктивности и резистором.

Сдвиг по фазе между колебаниями U_{RL} и U_R (а значит и I) экспериментально измеряется сначала в относительных единицах – делениях шкалы осциллографа Δn . После таких измерений, а также аналогичных измерений периода колебаний сдвиг по фазе между напряжением на участке и силой тока в радианах можно определить по формуле:

$$\psi_{RL} = 2\pi \frac{\Delta n}{n} \text{ (рад.)} \quad (21)$$

где Δn – сдвиг фаз между синусоидами в относительных единицах (длина клетки на экране осциллографа – см. рис. 8); n – длительность периода любой из синусоид в таких же относительных единицах.

10. Аналогичные измерения (см. п.п. 8–9) проведите также и на частотах, указанных в таблице 1. После переключения частоты при помощи регулятора развертки осциллографа (14) необходимо добиться устойчивой картины синусоидального напряжения длительностью 1–2 периода. Необходимо учесть, что при малых частотах (таких как 600 Гц) сдвиг фаз стремится к 0. Следует отметить, что возрастание фазового сдвига сопровождается уменьшением амплитуды напряжения U_{R0} , так как реактивная составляющая полного сопротивления ($X_L = \Omega L$) растёт с увеличением частоты Ω . Для удобства работы при определении сдвига фазы рекомендуется регулировать амплитуду синусоиды на экране осциллографа с помощью ручки (9). Результаты измерения в делениях шкалы Δn и n занесите в табл. 1. Экспериментальные значения сдвигов фаз в радианах рассчитайте по формуле (21) и также внесите в таблицу.

11. Теоретические значения сдвига фазы $\psi_{LR}^{\text{теор}}$ с учётом равенства (16) теоретической части данного описания можно рассчитать по следующей формуле:

$$\psi_{RL}^{\text{теор}} = \text{arctg} \left(\frac{\Omega L}{R + R_L} \right). \quad (16,a)$$

Расчётные значения добавляются в последнюю колонку таблицы 1 таблицы 2 после измерения L и C в **упражнении 3** и с использованием значений сопротивления R и R_L , измеренных в **Упр. 1**.

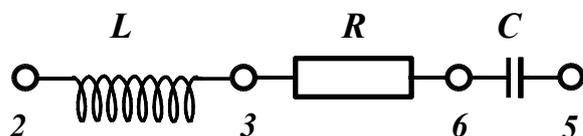
Для частоты 60 кГц (наибольший сдвиг фаз) следует провести оценку погрешностей полученных экспериментальных и теоретических результатов.

Таблица 1. Разность фаз ψ_{RL} между силой тока $I(t)$ и напряжением $U_{RL}(t)$ в цепи с резистором и катушкой индуктивности («RL-цепь»)

f, Гц	Ω , рад/с	n, дел.	Δn , дел.	ψ_{RL} , рад.	
				Эксперимент	Теория
600	3 768				
3000	18 840				
6000	37 680				
10000	62 800				
60000	188 400				

Сравните **измеренные** экспериментальные значения $\psi_{RC}^{теор}$ с теоретическими $\psi_{RC}^{теор}$, количественно для частоты 60 кГц и качественно для остальных частот.

б) Сдвиг фаз между силой тока и напряжением на участке цепи с резистором и конденсатором



1. Подключите генератор к гнездам «3» и «5» – общий к гнезду «3».
2. Подключите 1-й канал осциллографа – «КАН 1» к участку цепи с резистором R : длинный конец кабеля подсоедините к гнезду «3», короткий – к гнезду «6».
3. Подключите 2-й канал осциллографа «КАН 2» к участку цепи с резистором и конденсатором: длинный конец кабеля подсоедините к гнезду «3», короткий – к гнезду «5».
4. Следуя методике, описанной в пункте **а)**, измерьте сдвиг фаз ψ_{RC} между силой тока и напряжением на частотах, указанных в таблице 2.
5. Результаты измерения сдвигов по фазе между колебаниями U_{RC} и I в относительных единицах Δn , а также аналогичных измерений периода колебаний n запишите в таблицу 2. Добавьте в неё значения $\psi_{RC}^{эксп}$, рассчитанные по формуле (21) в радианах.
6. Теоретические значения сдвига фаз добавляются в последний столбец таблицы 2 после измерения L и C в упражнении 3. Они рассчитываются аналогично пункту **а)** данного упражнения с учётом равенства (16) теоретической части данного описания по формуле:

$$\psi_{RC}^{теор} = \text{arctg}\left(-\frac{1}{\Omega CR}\right). \tag{16,б}$$

Для частоты 100 Гц (наибольший сдвиг фаз) следует провести оценку погрешностей полученных экспериментальных и теоретических результатов.

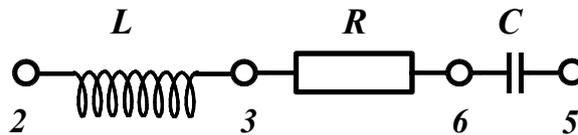
Сравните **измеренные** экспериментальные значения $\psi_{RC}^{теор}$ с теоретическими $\psi_{RC}^{теор}$, количественно для частоты 100 Гц и качественно для остальных частот.

Таблица 2. Разность фаз ψ_{RC} между силой тока $I(t)$ и напряжением $U_{RC}(t)$ в цепи с резистором и конденсатором («RC-цепь»)

f, Гц	Ω , рад/с	n, дел.	Δn , дел.	ψ_{RC} , рад.	
				Эксперимент	Теория
100	628				
300	1884				
600	3 768				
1 000	6 280				
6 000	37 680				

Упражнение 3. Измерение сил токов и напряжений в цепи с катушкой индуктивности, конденсатором и сопротивлением («RLC»).
Определение величин индуктивности и электроемкости

а) Измерение сил токов и напряжений



1. Установите вольтметр в режим измерения переменного напряжения «V~».

Подключите вольтметр к гнездам «2» и «5» платы.

2. К тем же гнездам «2» и «5» подключите выход генератора, установите частоту **600 Гц**. Регулятором напряжения (7) установите выходное напряжение генератора $U \sim 5-6$ В, контролируя его по вольтметру. Данное значение занесите в колонку 7 таблицы 3.

3. Подключите вольтметр к гнездам «2» и «3» для измерения действующего значения напряжения на катушке индуктивности U_L^* .

4. Подключите вольтметр к гнездам «3» и «6» для измерения действующего значения напряжения на резисторе U_R^* .

5. Подключите вольтметр к гнездам «6» и «5» для измерения действующего значения напряжения на конденсаторе U_C^* .

6. Полученные значения занесите в таблицу 3.

7. Установите частоту генератора **6000 Гц**. Повторите пункты 1–6 данного упражнения.

8. Используя результат измерения сопротивления R из **Упр. 1**, по формуле $I = U_R/R$ вычислите действующие значения сил тока в цепи на этих частотах. Результаты расчёта занесите в таблицу 3.

9. Убедитесь, что сумма значений U_L , U_R и U_C не равна действующему значению приложенного к участку цепи общего напряжения U . Объясните, почему?

* Для упрощения обозначений в дальнейшем мы не будем использовать дополнительный нижний индекс «d».

Таблица 3. Действующие значения силы тока и напряжений в «RLC-цепи»

$f, \text{Гц}$	$\Omega, \text{рад/с}$	$I, \text{мА}$	$U_L, \text{В}$	$U_R, \text{В}$	$U_C, \text{В}$	$U, \text{В}$
600	3 768					
6000	37 680					

б) Определение значений индуктивности L и ёмкости C

Используя результаты измерений действующих значений напряжений и сил токов из таблицы 3, проведите расчёт значений индуктивности L и ёмкости C по формулам:

$$L = \frac{\sqrt{\left(\frac{U_L}{I}\right)^2 - R_L^2}}{\Omega} \quad \text{и} \quad C = \frac{I}{\Omega U_C}. \quad (22)$$

Используйте значение R_L , измеренное в **Упр. 1**. Результаты расчёта запишите в таблицу 4.

Таблица 4. Рассчитанные значения индуктивности L и ёмкости C

$f, \text{Гц}$	$\Omega, \text{рад/с}$	$L, \text{мГн}$	$C, \text{нФ}$
600	3 768
6000	37 680
Результат:		(... ± ...)	(... ± ...)

в) Определение полного сопротивления и сдвига фазы между напряжением и силой тока для участка цепи «RLC»

1. Используя результаты измерений из табл. 3, найдите экспериментальные значения полного сопротивления цепи $Z^{\text{экс}} = \frac{U}{I}$ для двух частот и внесите его в таблицу 5.

2. Используя результаты из табл. 4, а также значения R и R_L , измеренные в **Упр. 1**, рассчитайте по формуле

$$Z^{\text{теор}} = \sqrt{(R + R_L)^2 + (\Omega L - 1/\Omega C)^2}$$

теоретические значения полного сопротивления участка «RLC» для двух частот и запишите их в табл. 5.

г) Определение сдвига фазы между полным напряжением, приложенным к участку цепи, и силой тока, протекающего по нему

$$\text{tg}\psi^{\text{теор}} = \frac{\Omega L - 1/\Omega C}{R + R_L}; \quad \psi^{\text{теор}} = \text{arctg}\left(\frac{\Omega L - 1/\Omega C}{R + R_L}\right).$$

При вычислении ψ используйте найденные значения L и C и полное омическое сопротивление цепи $(R + R_L)$ из **Упр. 1**. Результат запишите в табл. 5.

Таблица 5. Полное сопротивление и сдвиг фаз в «RLC»-цепи

$f, \text{Гц}$	$\Omega, \text{рад/с}$	$Z, \text{Ом}$		$\psi, \text{рад}$	
		Эксперимент	Теория	Эксперимент	Теория
600	3 768	(... ± ...)	(... ± ...)	(... ± ...)	(... ± ...)
6000	37 680	(... ± ...)	(... ± ...)	(... ± ...)	(... ± ...)

3. По указанию преподавателя постройте векторную диаграмму для одной из частот.

ПО ОКОНЧАНИИ РАБОТЫ ВЫКЛЮЧИТЕ ПРИБОРЫ !!!

Указание по обработке результатов измерений

1. Величины R , R_L , U_L , U_R , U_C , I являются результатами однократных прямых измерений, поэтому при записи результатов для них следует использовать приборные погрешности. Погрешность для силы тока рассчитывается как для результата однократных косвенных измерений.

2. При оценке погрешностей величин измеренных несколько раз в качестве оценки **погрешности измерений** принимается среднее модулей частных отклонений соответствующей величины от её среднего значения. Необходимо учесть также наличие **приборных погрешностей**. После чего экспериментальный результат должен быть записан в стандартной форме.

5. Основные итоги работы

В результате выполнения работы должны быть определены сдвиги фаз для участков цепи с резистором и катушкой индуктивности и резистором и конденсатором на разных частотах (см. упражнение 2). А также значения параметров цепи R , L , C ; полные сопротивления и сдвиги фаз для цепи «RLC» на частотах 600 и 6000 Гц.

Все результаты должны быть представлены в стандартном виде с указанием погрешности измерения.

6. Контрольные вопросы

1. Что такое квазистационарный переменный ток?
2. Сформулируйте закон Ома для участка цепи переменного тока.
3. Что такое полное сопротивление участка цепи переменного тока?
4. Что такое омическое, индуктивное и ёмкостное сопротивления?
5. Как зависят омическое, индуктивное и ёмкостное сопротивления от частоты переменного тока?
6. Каковы фазовые соотношения между силой тока и напряжением для участков с основными пассивными элементами цепей переменного тока – резистором («R»), катушкой индуктивности («L») и конденсатором («C»)? Как выглядят векторные диаграммы для этих участков?
7. Как зависит фаза колебаний силы тока в «последовательном RLC-контуре» от частоты приложенного напряжения?
8. Что такое резонанс в «последовательном RLC-контуре»? Каково соотношение фаз между силой тока и приложенным к «RLC-цепочке» напряжением при резонансе? Какова при этом фаза напряжений на отдельных элементах этой цепи?
9. Что означает термин «резонанс напряжений» для последовательного контура?
10. При каком значении частоты приложенного напряжения максимальна амплитуда напряжения на конденсаторе?

7. Указания по технике безопасности

1. Перед выполнением работы получить инструктаж у преподавателя и лаборанта.
2. Соблюдать общие правила техники безопасности работы в лабораториях общего физического практикума.

8. Приложения

Приложение 1. Описание используемых приборов.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. (используемые приборы)

1) Генератор ГЗ –118

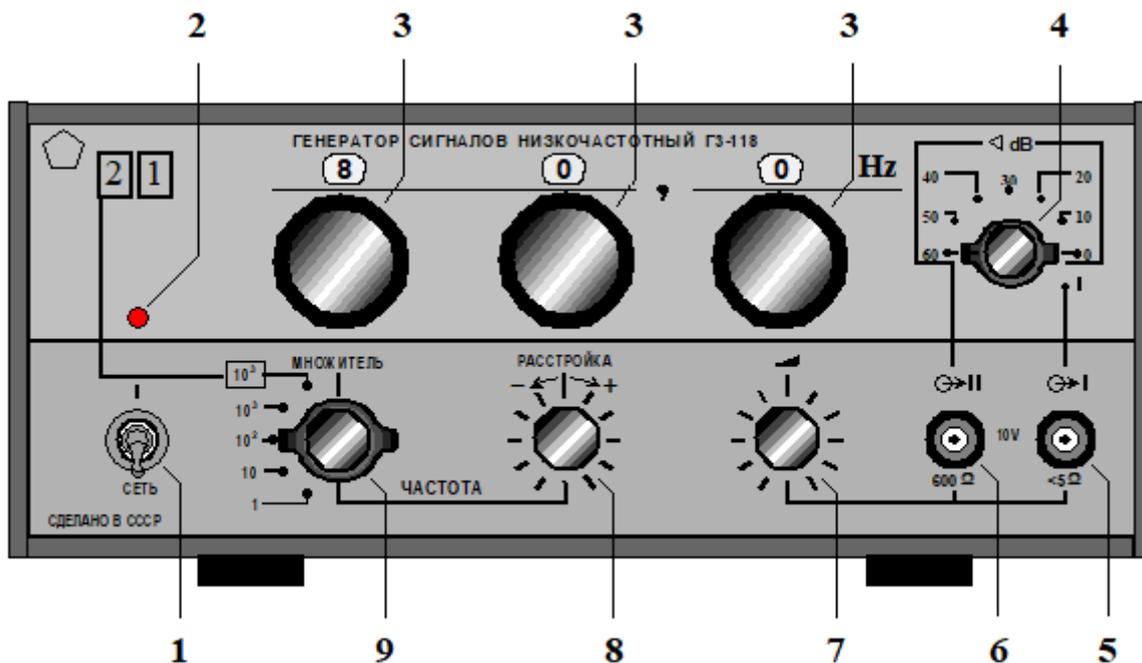


Рис. 9. Лицевая панель генератора ГЗ – 118.

Подготовка генератора к работе

1. Убедитесь, что выходной кабель подключен к гнезду (6) – выход «**600 Ω** ». Другой конец кабеля заканчивается двумя штеккерами на проводах разной длины. Длинный провод соединен с корпусом прибора и, таким образом, с общей точкой схемы генератора. Часто корпус прибора соединяют с землей. Поэтому длинный провод на другом конце кабеля называют «**Общим**» или «**Земля**» – (символ \perp или \perp). Короткий провод часто называют «**сигнальным**».

2. Переключатель поддиапазонов частот (9) установите в положение «**10²**».

3. Переключатели установки частоты (3) установите в положение «**60,0 Hz**».

4. Переключатель ступенчатого ослабления выходного напряжения (4) установите в положение «**0**».

5. Ручку плавной расстройки частоты (8) установите в среднее положение.

6. Ручку плавной регулировки выходного напряжения (7) перед началом эксперимента поверните до упора против часовой стрелки – в этом случае напряжение на выходе генератора минимальное.

2) Вольтметр В7-38

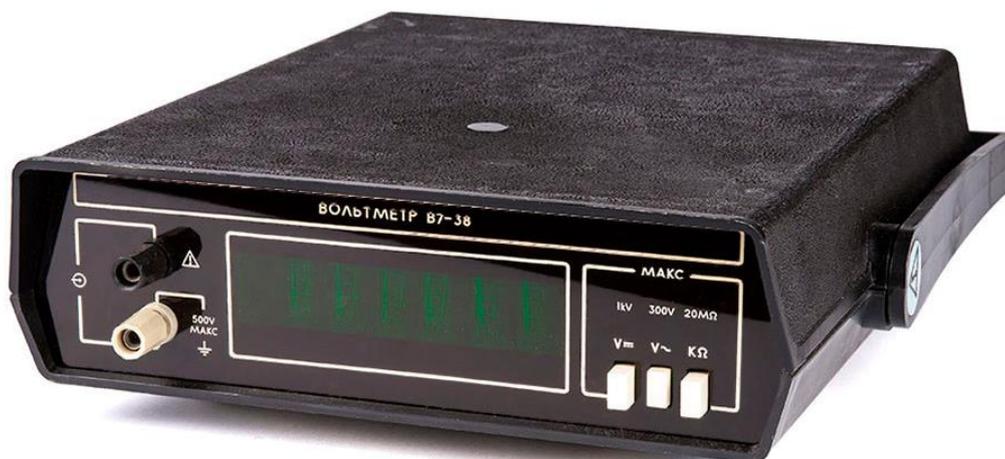


Рис. 10. Внешний вид и лицевая панель вольтметра В7-

На передней панели вольтметра отсутствует тумблер для включения его в сеть. Напряжение от сети подается на вольтметр сразу после подключения его кабеля питания к розетке лабораторной электросети « $\sim 220\text{ В}$ ».

Слева от экрана находятся две клеммы для подключения вольтметра специальными проводами к точкам электрической схемы.

Справа – три кнопки для выбора режима измерения.

Цифровые осциллографы

Краткое описание работы цифровых осциллографов

Цифровой осциллограф можно рассматривать как конструктивное объединение аналогового осциллографа и электронно-вычислительной машины. С его помощью можно не только отображать характеристику напряжения в реальном времени, но и выполнять различные математические операции: складывать и вычитать сигналы в разных каналах, растягивать во времени фрагменты записанного в память сигнала и т.д.

Поступающий на осциллограф входной сигнал $S(t)$ проходит через масштабирующее устройство (усилитель и делитель напряжения) и попадает в **аналого-цифровой преобразователь – АЦП**. Задача этого звена – заменить полученную аналоговую зависимость дискретной последовательностью его значений для разных моментов времени – **выборками**. Каждая выборка записывается в **оперативное запоминающее устройство – ОЗУ**, при этом, все предыдущие записанные отсчеты сдвигаются на одну ячейку – **регистр сдвига**, а самый первый S_1 исчезает, как бы "**выталкивается**". Если **ОЗУ** состоит из M ячеек, то в нем, постоянно обновляясь, содержится M последних, "**свежих**" **выборок**. Так продолжается до тех пор, пока не будет выполнено некое заданное условие, например, когда какое-либо $S(t_i)$ в очередной **выборке** впервые не превысит заданный оператором уровень. После этого, содержимое некоторого количества ячеек **ОЗУ** переписывается в **запоминающее** устройство, где каждой ячейке соответствует точка на экране, отличающаяся от фона. Координата X определяется номером ячейки, а координата Y значением **выборки**, которое находится в этой ячейке.

В отличие от аналоговых осциллографов, цифровые осциллографы позволяют запоминать в оперативном запоминающем устройстве много выборок, а потом **"вытягивать"** их порциями, соответствующими ширине экрана.

Также еще одно принципиальное отличие от аналоговых осциллографов состоит в том, что на цифровом осциллографе можно видеть предысторию сигнала до появления импульса запуска. Это называют **"предварительным запуском"**. Выборки переписываются из оперативного запоминающего устройства в запоминающее устройство так, что в момент появления импульса запуска первой ячейкой запоминающего устройства будет та, что дает точку на вертикальной линии, проходящей через центр экрана. Последующие точки располагаются вправо от неё, предыдущие – налево. Положение первой ячейки можно смещать влево или вправо от центра и тем самым соответственно уменьшать или увеличивать видимый интервал предыстории.

Частоту **дискретизации** (частоту **"выборок"**) можно изменять в широких пределах, что соответствует изменению масштаба по горизонтали и аналогично изменению скорости развёртки в аналоговых осциллографах.

Для изменения масштаба по вертикали, как и в аналоговых осциллографах, можно изменять коэффициенты усиления или деления соответственно входного усилителя или делителя напряжения.

Благодаря перечисленным преимуществам цифровые осциллографы в настоящее время почти вытеснили осциллографы аналоговые.

Осциллограф АКИП-4126/2А

Подготовка осциллографа к работе

1. Нажатием на кнопку (1) подключите осциллограф (Рис. 10) к сети и подождите появления на экране заставки. В течение 10 секунд осциллограф автоматически перейдет в режим отображения осциллограмм. До подачи сигналов на экране отображаются линии развёртки.



Рис. 11. Лицевая панель осциллографа АКИП-4126/2А.

2. Если по какой-либо причине 1-й и 2-й каналы осциллографа оказались выключенными, включите их однократным нажатием на кнопки «2» и «3» соответственно. Сигнал, поступающий по 1 каналу («КАН 1»), отображается на экране жёлтым цветом, по 2 каналу («КАН 2») – фиолетовым.

3. Нажмите на кнопку (4) для вызова на экран всплывающих меню синхронизации.

Сверху над кнопками (5) на экране появляются всплывающие меню. Обзор меню и выбор осуществляется поочередным нажатием на кнопки. Двигаясь слева направо, установите следующий режим синхронизации:

- а) «**фронт**» – синхронизация по фронту сигнала,
- б) «**Источник «КАН. 1»**» – источник синхронизации **КАН. 1**,
- в) «**наклон** \int » – синхронизация по переднему фронту сигнала,
- г) «**удержание «ВЫКЛ»**»,
- д) «**Связь Вк. АС**» – вход закрыт для постоянной составляющей сигнала,
- е) «**Фильтр шума**» – **Вкл.**

Повторным нажатием на кнопку (4) уберете выпадающее меню.

4. Нажмите на кнопку (6) – «**Дисплей**» для вызова на экран всплывающих меню управления режимами экрана, размещенных на двух страницах – первая – **Стр 1/2**, вторая – **Стр 2/2**.

На первой странице. Двигаясь слева направо, поочередным нажатием на кнопки установите следующий режим работы дисплея:

- а) – «**Тип Вектор**» – определяет характер отображения сигнала на экране,
- б) – «**Цвет Выкл.**»,
- в) – «**Послесвечение - Выкл.**»,

На второй странице. В том же порядке установите:

- г) – «**Сетка** » – выбор типа экранной сетки,
- д) – «**80%**» – яркость луча (вращением регулятора (7)),
- е) – «**100%**» – яркость сетки (тем же регулятором (7)),
- ж) – «**Прозрачность 50%**»

В процессе работы могут понадобиться следующие регулировки:

5. «**В-мВ**» – изменение коэффициента отклонения каналов по вертикали. Регулировка осуществляется вращением кнопок-регуляторов (8), которые работают в двух режимах – «**грубо**» и «**плавно**». Смена режима происходит при нажатии на регулятор.

6. «**Смещение**» – кнопка-регулятор смещения линии развёртки выбранного канала в вертикальном направлении (9). Нажатие на регулятор устанавливает линию развёртки в центр экрана.

7. «**Смещение**» – кнопка-регулятор смещения линий развёртки в горизонтальном направлении (10). Нажатие на регулятор устанавливает линии развёртки в центр экрана.

8. «**нс ↔ с**» – кнопка-регулятор установки времени развёртки (11). Вращение регулятора изменяет значение коэффициента развёртки. Возврат к первоначальному значению производится нажатием на кнопку-регулятор.

9. «**USB**» – разъём (12) для подключения внешнего **USB** носителя для записи результатов измерений.