

**Министерство образования и культуры  
Кыргызской Республики.**

**Кыргызский Государственный Технический Университет  
им. И. Раззакова.**

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ**

Методические указания по выполнению контрольной работы по дисциплине  
«Физические основы электроэнергетики».  
для студентов направления 551701 заочной формы обучения.

Бишкек 2011

«РАССМОТРЕНЫ»  
На заседании кафедры  
«Электроснабжение»  
Протокол № от

«ОДОБРЕНО»  
на заседании  
Методического совета ИДО и ПК  
Протокол № от

Составители: ДЖУСУПБЕКОВА Н.К., АСИЕВ А.Т.

Физические основы электроэнергетики: Методические указания по выполнению контрольной работы по курсу «Физические основы электроэнергетики» для студентов направления 551701 /Кырг. Госуд.Техн. ун-т/ сост. Н.К.Джусупбекова, А.Т. Асиев.

Излагается методика по выполнению контрольной работы, даны необходимые теоретические сведения по определению параметров линии электропередач, потерь активной мощности. Представлена поэтапное последовательность работы в программе Electronics Workbench: построение электрических схем, подключение измерительных приборов в цепях.

Ил.1 Библиогр. назв.2

Рецензент  
Начальник отдела ПТО  
ОАО «Электрические станции»

Оморов К.А.

## Составление схемы замещения линии электропередачи и вычисление её параметров.

**Цель работы:** Исследование физических процессов, проходящих в линии электропередачи. Расчет её параметров, и определение потерь мощности проходящих в линии в зависимости от различных факторов.

### 1. Общие методические указания.

#### 1.1. Составление схемы замещения линии электропередачи (ЛЭП) в целом и вычисление параметров линии со сосредоточенными параметрами.

Для проведения расчетов установившихся режимов и переходных процессов в электрической системе необходимо знать схемы замещения отдельных ее элементов. Схема замещения электрической цепи является ее количественной моделью. Она состоит из совокупности различных идеализированных элементов, выбранных таким образом, чтобы можно было с достаточно хорошим приближением описать проходящих в ней процессы. Электрический ток, протекающий в электрической цепи, неразрывно связан с магнитными и электрическими полями. При переменном токе эти поля изменяются во времени. Изменяющееся магнитное поле наводит э.д.с. Изменение электрического поля сопровождается изменением зарядов на проводниках. В проводниках, в резисторах, а часто и в окружающей среде электромагнитная энергия преобразуется в тепло.

Для того чтобы упростить исследование процессов в реальной электрической цепи переменного тока, ее заменяют схемой замещения составленной из элементов, каждый из которых учитывает одно из этих явлений.

Параметры фаз линий электропередач равномерно распределены по ее длине, т.е. линия электропередачи представляет собой цепь с равномерно распределенными параметрами. Точный расчет схемы, содержащей такую цепь, приводит к сложным вычислениям. В связи с этим при расчете линий электропередач в общем случае применяют упрощенные Т- и П-образные схемы замещения с сосредоточенными параметрами.

Для расчета удобнее пользоваться П – образной схемой замещения, которую и примем в основу дальнейшего рассмотрения (рис.1.1).

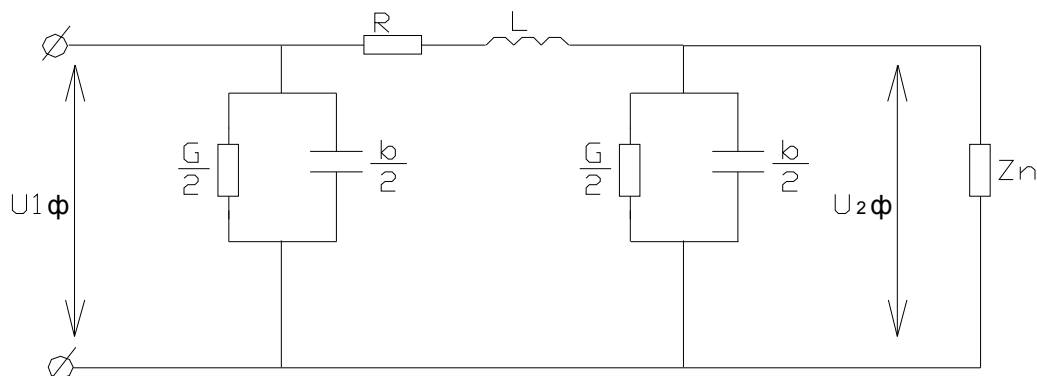


Рис.1.1.П-образная схема замещения ЛЭП

Выделим в схемах замещения продольные элементы — сопротивления ЛЭП  $Z=R+jX$  и поперечные элементы — проводимости  $Y=G+jB$  (рис.1.1). Значения указанных параметров для ЛЭП определяются по общему выражению

$$\Pi = \Pi_0 \cdot L, \quad (1.1)$$

где  $\Pi \{R_0, X_0, g_0, b_0\}$  — значение продольного или поперечного параметра, отнесенного к 1 км линии протяженностью  $L$ , км: Иногда эти параметры именуется погонными.

Для ЛЭП конкретного исполнения и класса напряжения используют частные случаи этих схем в зависимости от физического проявления и величины (значения) соответствующего параметра. Рассмотрим кратко суть этих параметров.

Активное сопротивление обуславливает нагрев проводов (тепловые потери) и зависит от материала токоведущих проводников и их сечения. Для линий с проводами небольшого сечения, выполненных цветным металлом (алюминий, медь), активное сопротивление принимают равным омическому (сопротивлению постоянному току), поскольку проявление поверхностного эффекта при промышленных частотах 50—60 Гц незаметно (около 1 %). Для проводов большого сечения (500 мм<sup>2</sup> и более) явление поверхностного эффекта при промышленных частотах значительно.

Активное погонное сопротивление линии определяется по формуле, Ом/км,

$$R_0 = \frac{\rho}{F}, \quad (1.2)$$

где  $\rho$  — удельное активное сопротивление материала провода, Ом·мм<sup>2</sup>/км;  $F$  — сечение фазного провода (жила), мм<sup>2</sup>. Для технического алюминия в зависимости от его марки можно принять  $\rho = 29,5—31,5$  Ом · мм<sup>2</sup>/км, для меди  $\rho = 18,0—19,0$  Ом·мм<sup>2</sup>/км.

Активное сопротивление не остается постоянным. Оно зависит от температуры провода, которая определяется температурой окружающего воздуха (среды), скоростью ветра и значением проходящего по проводу тока.

Омическое сопротивление упрощенно можно трактовать как препятствие направленному движению зарядов узлов кристаллической решетки материала проводника, совершающих колебательные движения около равновесного состояния. Интенсивность колебаний и, соответственно, омическое сопротивление возрастают с ростом температуры проводника.

Зависимость активного сопротивления от температуры провода  $t$  определяется в виде

$$R'_0 = R^{20}_0 [1 + \alpha(t - 20^\circ)] \quad (1.3)$$

где  $R^{20}_0$  — нормативное значение сопротивления  $R_0$ , рассчитывается по формуле (1.2), при температуре проводника  $t = 20^\circ\text{C}$ ;  $\alpha$  — температурный коэффициент электрического сопротивления, Ом/град (для медных, алюминиевых и сталеалюминевых проводов  $\alpha = 0,00403$ , для стальных  $\alpha = 0,00455$ ).

Трудность уточнения активного сопротивления линий по (1.3) заключается в том, что температура провода, зависящая от токовой нагрузки и интенсивности охлаждения, может заметно превышать температуру окружающей среды.

Таким образом определяем активное сопротивление для всей ЛЭП:

$$R_{л} = R_0 * l \quad (1.3a)$$

**Определение активного сопротивления с учетом поверхностного эффекта.** Силовые линии внутреннего магнитного поля напряженностью  $H$ , пересекая толщ проводника, наводит в нем вихревые токи  $I_{в,т}$ , направленные по закону Ленца, т.е. против вращения рукоятки при поступательном движении буравчика по направлению поля. Вихревые токи  $I_{в,т}$  в центре проводника имеют направление, обратное основному току  $I$ , протекающему по проводнику, а у поверхности проводника их направления совпадают. От взаимодействия вихревых токов с основным происходит перераспределение тока по сечению проводника, в результате чего плотность тока  $I_{рез}$  к поверхности проводника возрастает. Это явление носит название поверхностного эффекта. Вытеснение тока на поверхность проводника сокращает эквивалентную площадь его поперечного сечения, и, как следствие, его активное сопротивление  $R$  увеличивается, а внутренняя индуктивность уменьшается.

$$R_{п} = R_0 * \frac{2 * r_{пр} * \sqrt{\frac{\omega_1 \mu}{\gamma}}}{2000 * \sqrt{2 * 0.75}} \quad (1.4)$$

Где  $\mu = 4 * \pi * 10^{-7}$  – магнитная проницаемость.  $\gamma = 2,8 * 10^{-6}$

**Индуктивное сопротивление** обусловлено магнитным полем, возникающим вокруг и внутри проводника при протекании по нему переменного тока. В проводнике наводится ЭДС самоиндукции, направленная в соответствии с принципом Ленца, противоположно ЭДС источника

$$e_L = -\frac{d\psi}{dt} = -L \frac{di}{dt}.$$

Противодействие, которое оказывает ЭДС самоиндукции изменению ЭДС источника, и обуславливает индуктивное сопротивление проводника. Чем больше изменение потокосцепления  $d\psi/dt$ , определяемое частотой тока  $\omega = 2\pi f$  (скоростью изменения тока  $di/dt$ ), и величина индуктивности фазы  $L$ , зависящая от конструкции фазы и трехфазной ЛЭП в целом, тем больше индуктивное сопротивление элемента  $X = \omega L$ . То есть для одной и той же линии (или просто электрической катушки) с ростом частоты питающего тока  $f$  индуктивное сопротивление увеличивается. Естественно, что при нулевой частоте ( $\omega = 2\pi f = 0$ ), например, в сетях постоянного тока, индуктивное сопротивление ЛЭП отсутствует.

На индуктивное сопротивление фаз многофазных ЛЭП оказывает влияние также взаимное расположение фазных проводов (жил). Кроме ЭДС самоиндукции, в каждой фазе наводится противодействующая ей ЭДС взаимоиндукции. Поэтому при симметричном расположении фаз, например, по вершинам равностороннего треугольника, результирующая противодействующая ЭДС во всех фазах одинакова, а следовательно, одинаковы пропорциональные ей индуктивные сопротивления фаз. При горизонтальном расположении фазных проводов потокосцепление фаз неодинаково, поэтому индуктивные сопротивления фазных проводов отличаются друг от друга. Для достижения симметрии (одинаковости) параметров фаз на специальных опорах выполняют транспозицию (перестановку) фазных проводов.

Индуктивное сопротивление, отнесенное к 1 км линии, определяется по эмпирической формуле, Ом/км,

$$X_0 = \omega L_0 = \omega \left( 0.461lg \frac{D_{ср}}{r_{нр}} + 0,05\mu \right) * 10^{-3} \quad (1.5)$$

Если принять частоту тока 50 Гц, то при указанной частоте  $\omega = 2\pi f = 314$  рад/с для проводов из цветных металлов ( $\mu = 1$ ) получим, Ом/км,

$$X_0 = X'_0 + X''_0 = 0.144lg \frac{D_{ср}}{r_{нр}} + 0,016\mu \quad (1.6)$$

а при частоте 60 Гц соответственно ( $\omega = 376,8$  рад/с), Ом/км

$$X_0 = 0.173lg \frac{D_{ср}}{r_{нр}} + 0,019\mu \quad (1.7)$$

Индуктивное сопротивление для всей ЛЭП определяется:

$$X_{л} = X_0 * l \quad (1.7a)$$

При сближении фазных проводов влияние ЭДС взаимоиндукции возрастает, что приводит к уменьшению индуктивного сопротивления ЛЭП. Особенно заметно снижение индуктивного сопротивления (в 3—5 раз) в кабельных линиях. Разработаны компактные ВЛ высокого и сверхвысокого напряжения повышенной пропускной способности со сближенными фазами с использованием эффекта взаимного влияния цепей и сниженным на 25—30 % индуктивным сопротивлением [2, 3, 7].

Величина среднегеометрического расстояния между фазными проводами (жилами), м,

$$D = \sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{13} \cdot D_{23}} \quad (1.8)$$

зависит от расположения фазных проводов (шин). Фазы ВЛ могут располагаться горизонтально или по вершинам треугольника, фазные шины токопроводов в горизонтальной или вертикальной плоскости, жилы

трехжильного кабеля — по вершинам равностороннего треугольника. Значения  $D_{cp}$  и  $r_{np}$  должны иметь одинаковую размерность.

При отсутствии справочных данных фактический радиус многопроволочных проводов  $r_{np}$  можно определить по суммарной площади сечения токоведущей и стальной части провода, увеличив его с учетом скручивания на 15—20 %, т.е.

$$r_{np} = (1,15 - 1,20) \sqrt{\frac{F + F_{ст}}{\pi}} \quad (1.9)$$

Таким образом, активное сопротивление ЛЭП зависит от материала, сечения и температуры провода. Зависимость  $R_0 = \varphi(F)$  обратно пропорциональна сечению провода, ярко выражена при малых сечениях, когда  $R_0$  имеет большие значения, и мало заметна при больших сечениях проводов. Индуктивное сопротивление ЛЭП определяется исполнением линии, конструкцией фазы и практически не зависит от сечения проводов (значение  $\lg(D_{cp} / r_{np}) \approx \text{const}$ ).

Емкостная проводимость обусловлена емкостями между фазами, фазными проводами (жилами) и землей.

В практических расчетах рабочую емкость трехфазной ВЛ с одним проводом в фазе на единицу длины (Ф/км) определяют по формуле

$$C_0 = \frac{0.024}{\log \frac{D_{cp}}{r_{np}}} * 10^{-6} \quad (1.10)$$

Рабочая емкость кабельных линий существенно выше емкости ВЛ, так как жилы кабеля очень близки друг к другу и заземленным металлическим оболочкам. Кроме того, диэлектрическая проницаемость кабельной изоляции значительно больше единицы — диэлектрической проницаемости воздуха. Большое разнообразие конструкций кабеля, отсутствие их геометрических размеров усложняет определение ее рабочей емкости, в связи с чем на практике пользуются данными эксплуатационных или заводских замеров (например, табл. 2.1).

Емкостная проводимость ВЛ и КЛ, См/км, определяется по общей формуле

$$b_0 = \omega c_0 \quad (1.10 \text{ а})$$

С учетом (1.10 а) для воздушной линии при частоте тока 50 Гц имеем, См/км,

$$b_0 = \frac{7.58}{\log \frac{D_{cp}}{r_{np}}} * 10^{-6} \quad (1.11)$$

а для ВЛ с частотой питающего напряжения 60 Гц получим, См/км,

$$b_0 = \frac{9.04}{\log \frac{D_{cp}}{r_{np}}} * 10^{-6} \quad (1.12)$$

Емкостная проводимость КЛ зависит от конструкции кабеля и указывается заводом-изготовителем, но для ориентировочных расчетов она может быть оценена по формуле (1.11).

Емкостная проводимость для всей линии электропередач определяется:

$$B_{л} = b_0 * l$$

Под действием приложенного к линии напряжения через емкости линий протекают емкостные (зарядные) токи. Тогда расчетное значение емкостного тока на единицу длины, кА/км,

$$I_{c_0} = U_{\phi} * b_0 = \frac{1}{\sqrt{3}} * U b_0 \quad (1.13)$$

и отвечающая ему зарядная мощность трехфазной ЛЭП, Мвар/км,

$$Q_{c_0} = 3U_{\phi} I_{c_0} = 3U_{\phi}^2 b_0 = U^2 b_0 \quad (1.14)$$

зависят от напряжения в каждой точке линии.

Реактивное емкостное сопротивление ЛЭП определяется как,

$$X_c = \frac{1}{\omega C} \quad (1.15)$$

где  $C = \frac{B_{л}}{\omega}$

ЛЭП с поперечной емкостной проводимостью, потребляющая из сети опережающий напряжение емкостный ток, следует рассматривать как источник реактивной (индуктивной) мощности, чаще называемой зарядной. Имея емкостной характер, зарядная мощность уменьшает индуктивную составляющую нагрузки, передаваемой по линии к потребителю.

В схемах замещения ВЛ, начиная с номинального напряжения 110 кВ, и в КЛ 35 кВ и более (рис. 1.6) следует учитывать поперечные ветви (шунты) в виде емкостных проводимостей  $B_c$  или генерируемых ими реактивных мощностей  $Q_c$ .

### **Определение потери активной мощности в ЛЭП.**

Потери активной мощности без учета явления поверхностного эффекта и температуры окружающей среды:

$$\Delta P = 3 * I^2 * R \quad (1.16)$$

Потери активной мощности с учетом температуры окружающей среды:

$$\Delta P_t = 3 * I^2 * R_t \quad (1.17)$$

Потери активной мощности с учетом поверхностного эффекта:

$$\Delta P_{\pi} = 3 * I^2 * R_{\pi} \quad (1.18)$$



### Порядок выполнения работы:

1. Нарисовать схему замещения ЛЭП.
2. На основе исходных данных (приложение 1 и 2) рассчитать параметры линии. Определить зависимость параметров линии от: частоты электрического тока, влияния поверхностного эффекта, температуры окружающей среды.
3. Рассчитать параметры активной и реактивной мощности в линии, её зарядную мощность. Определить зависимость зарядной мощности линии от частоты электрического тока  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$  с учетом влияния явления поверхностного эффекта и температуры окружающей среды.
4. Написать вывод по полученным результатам.

### Контрольные вопросы.

1. Что такое схема замещения ЛЭП? Зачем она нужна?
2. От чего зависит активное сопротивление проводника?
3. От чего зависит реактивное сопротивление проводника?
4. Что такое поверхностный эффект?
5. От чего зависит КПД ЛЭП?
6. Что такое зарядная мощность линии?
7. Как влияет частота электрического тока на зарядную мощность линии?
8. Почему при расчетах ЛЭП учитывают температуру окружающей среды?
9. Как определяются потери активной и реактивной мощности линии?

# Изучение переходных процессов в простейших электрических цепях с помощью программы Electronics Workbench

**Цель работы:** построение простейших электрических схем; изучение происходящих в них процессов при установившемся режиме работы и коммутациях, снятие и анализ показаний измерительных приборов с расчетными значениями.

## 5. Общие методические указания.

5.1 Возможности Electronics Workbench. Программа Electronics Workbench, предназначена для моделирования и анализа электрических схем. Она позволяет моделировать аналоговые, цифровые и цифро-аналоговые схемы большой степени сложности. Имеющиеся в программе библиотеки включают в себя большой набор широко распространенных электронных компонентов. Есть возможность подключения и создания новых библиотек компонентов. Параметры компонентов можно изменять в широком диапазоне значений. Простые компоненты описываются набором параметров, значения которых можно изменять непосредственно с клавиатуры, активные элементы - моделью, представляющей собой совокупность параметров и описывающей конкретный элемент или его идеальное представление. Модель выбирается из списка библиотек компонентов, параметры модели также могут быть изменены пользователем. Широкий набор приборов позволяет производить измерения различных величин, задавать входные воздействия, строить графики. Все приборы изображаются в виде, максимально приближенном к реальному, поэтому работать с ними просто и удобно. Результаты моделирования можно вывести на принтер или импортировать в текстовый или графический редактор для их дальнейшей обработки. Программа Electronics Workbench совместима с программой P-SPICE, то есть предоставляет возможность экспорта и импорта схем и результатов измерений в различные её версии.

Основные достоинства программы: дает уникальные возможности для планирования и проведения широкого спектра исследований электронных схем при минимальных затратах времени.

5.1.1 Компоненты и проведение экспериментов. В библиотеки компонентов программы входят пассивные элементы, транзисторы, управляемые источники, управляемые ключи, гибридные элементы, индикаторы, логические элементы, триггерные устройства, цифровые и аналоговые элементы, специальные комбинационные и последовательные схемы. Активные элементы могут быть представлены моделями как идеальных, так и реальных элементов. Возможно также создание своих моделей элементов и добавление их в библиотеки элементов. В программе используется большой набор приборов для проведения измерений: амперметр, вольтметр, осциллограф, мультиметр. Боде-плоттер (графопостроитель частотных характеристик схем), функциональный генератор, генератор слов, логический анализатор и логический преобразователь.

Программа также позволяет производить анализ цифро-аналоговых и цифровых схем. В Electronics Workbench можно исследовать переходные процессы при воздействии на схемы входных сигналов различной формы.

Electronics Workbench позволяет строить схемы различной степени сложности при помощи следующих операций:

- выбор элементов и приборов из библиотек;
- перемещение элементов и схем в любое место рабочего поля;

- поворот элементов и групп элементов на углы, кратные 90 градусам;
- копирование, вставка или удаление элементов, групп элементов, фрагментов схем и целых схем;
- изменение цвета проводников;
- выделение цветом контуров схем для более удобного восприятия;
- одновременное подключение нескольких измерительных приборов и наблюдение их показаний на экране монитора;
- присваивание элементу условного обозначения;
- изменение параметров элементов в широком диапазоне;

Все операции производятся при помощи мыши и клавиатуры. Управление только с клавиатуры невозможно. Путем настройки приборов можно:

- изменять шкалы приборов в зависимости от диапазона измерений;
- задавать режим работы прибора;
- задавать вид входных воздействий на схему (постоянные и гармонические токи и напряжения, треугольные и прямоугольные импульсы).

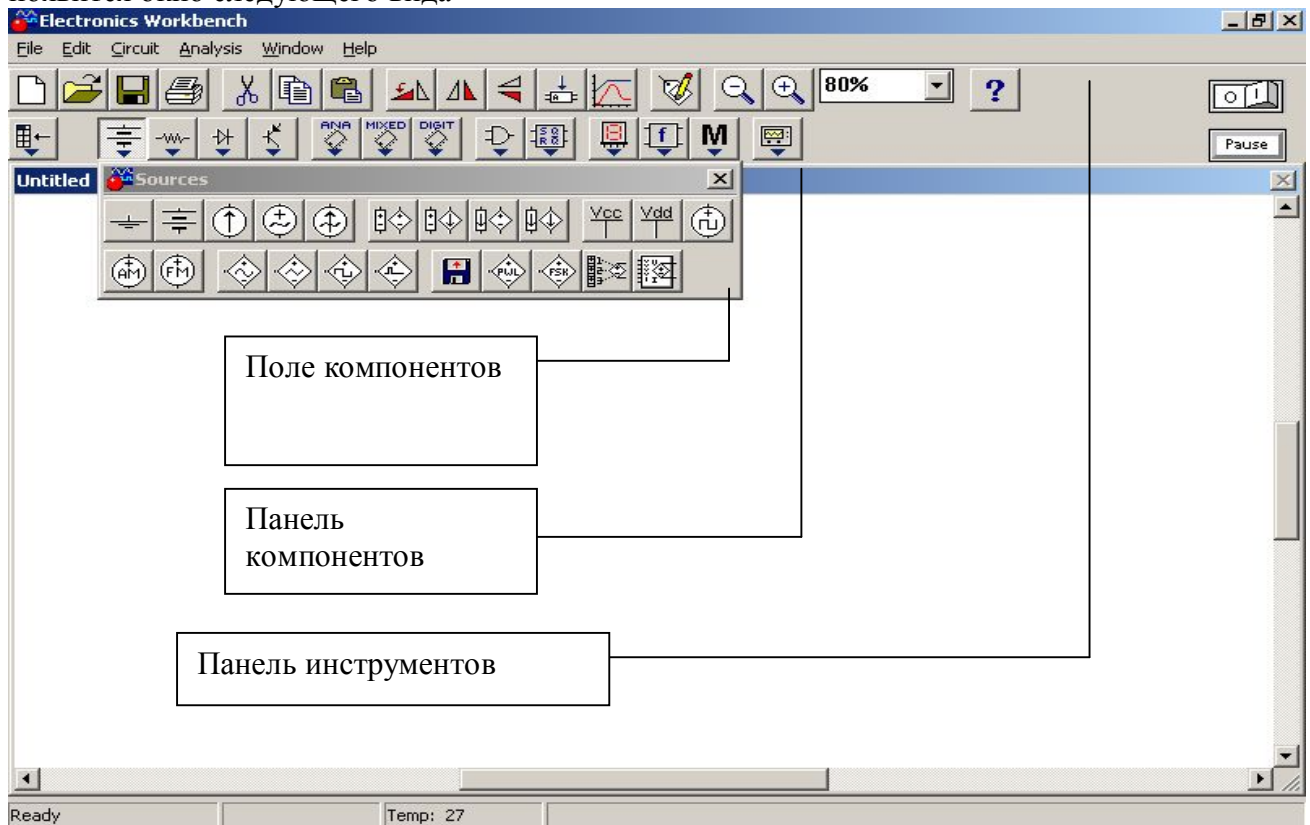
Графические возможности программы позволяют:

- одновременно наблюдать несколько кривых на графике;
- отображать кривые на графиках различными цветами;
- измерять координаты точек на графике;
- импортировать данные в графический редактор, что позволяет произвести необходимые преобразования рисунка и вывод его на принтер.

## 5.2. Запуск программы.

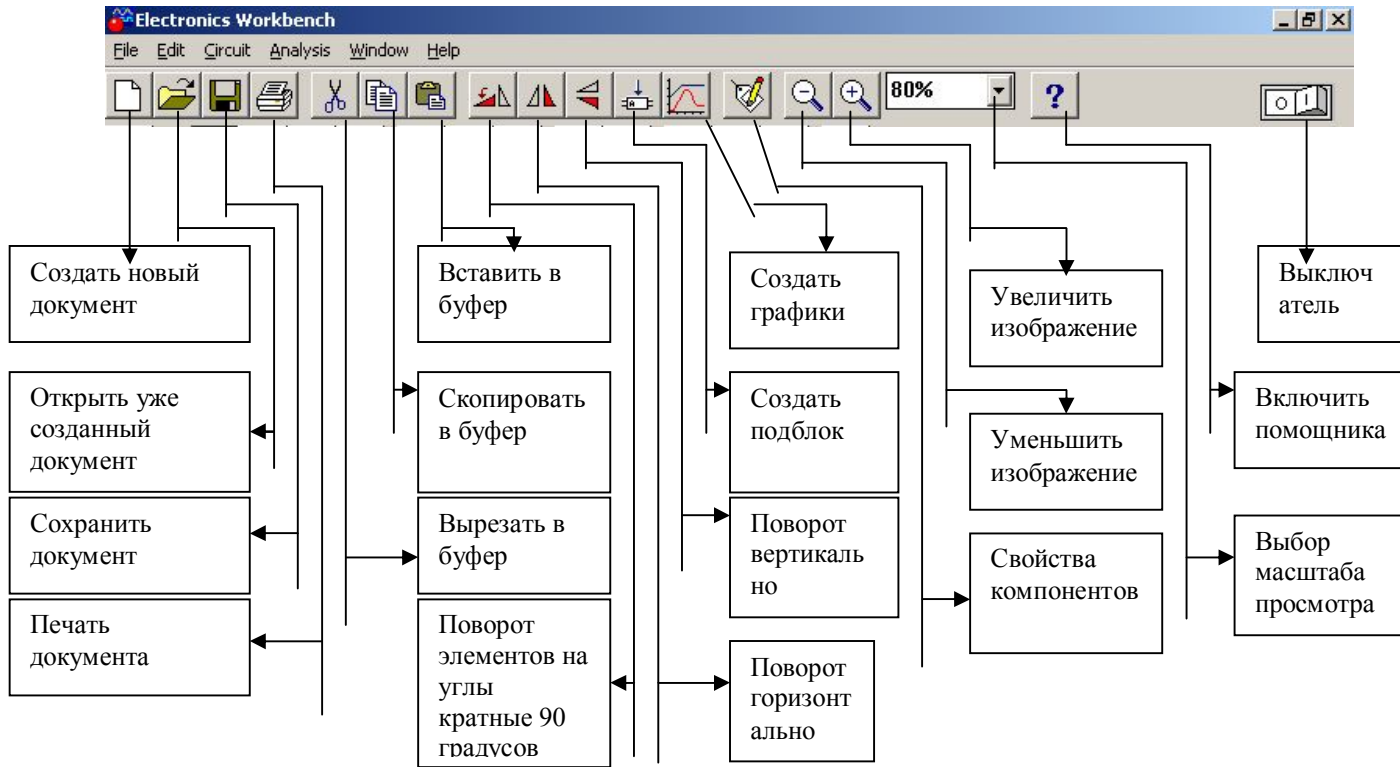
На рабочем столе компьютера открыть ярлык "Мой компьютер" затем "Локальный диск С". Найти папку ЭWD512 и запустить программу

5.3. Основные элементы Electronics Workbench После запуска программы на экране появится окно следующего вида

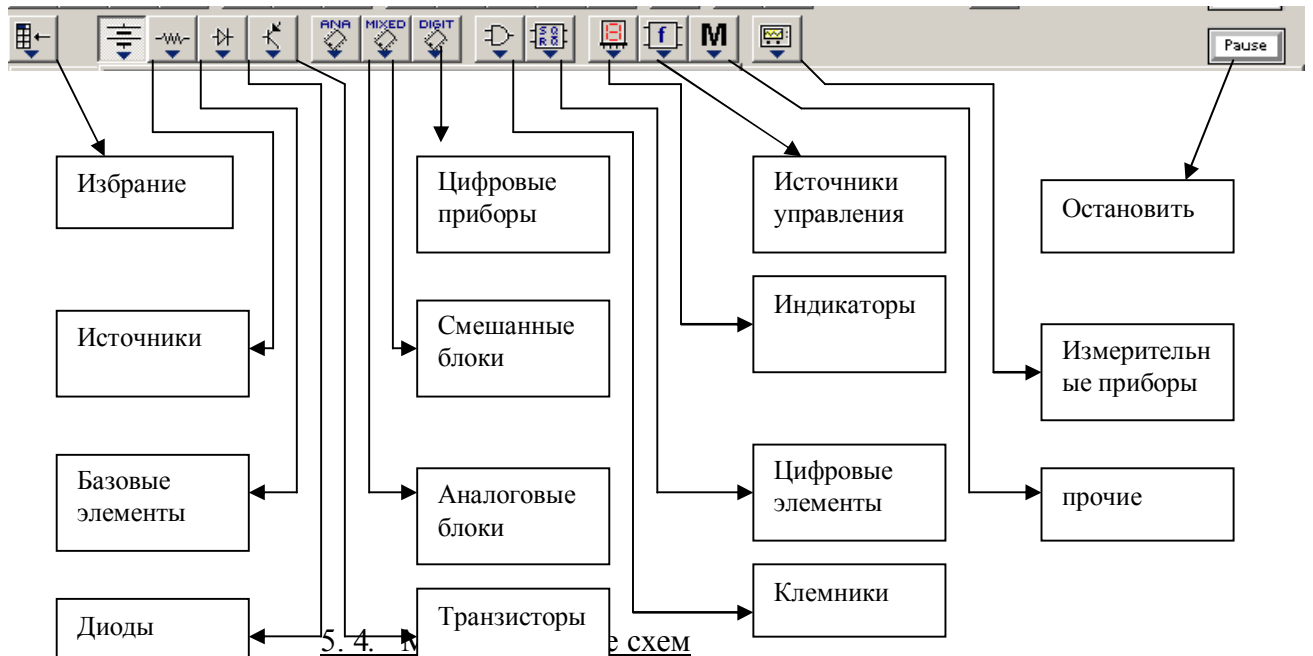


### 5.3.1. Панели.

## Панель инструментов.



## 5.3.2. Панель компонентов.



Electronics Workbench позволяет строить аналоговые, цифровые и цифро-аналоговые схемы различной степени сложности.

Исследуемая схема собирается на рабочем поле при одновременном использовании мыши и клавиатуры. Применение в работе только клавиатуры невозможно. При построении и редактировании схем выполняются следующие операции:

- выбор компонента из библиотеки компонентов;
- выделение объекта;

- перемещение объекта;
- копирование объектов;
- удаление объектов;
- соединение компонентов схемы проводниками;
- установка значений компонентов;
- подключение приборов.

5.4.1. выбор компонента из библиотеки компонентов. Выбор нужного компонента производится из поля компонентов, нужное поле компонентов выбирается нажатием левой кнопки мыши на одной из пиктограмм панели компонентов. При этом в выборе компонентов появляются изображения соответствующих компонентов. После выбора поля компонентов нужный компонент при помощи мыши перемещается на рабочее поле.

5.4.2. Выделение объекта и его перемещение. Выделение объекта осуществляется при помощи мыши (под объектом подразумевается как один компонент, так и группа компонентов). При выборе компонента нужно установить указатель мыши на нужный компонент и щелкнуть левой кнопкой мыши. Для выбора группы компонентов нужно установить указатель мыши в один из углов прямоугольной области, содержащей группу, и нажав левую кнопку мыши, растянуть рамку до необходимых размеров, после чего отпустить кнопку. Выбранный объект изменяет свой цвет на красный. Снять выделение можно щелчком мыши в любой точке рабочего поля.



5.4.3. Копирование и удаление объектов. Копирование объектов осуществляется при помощи команды Copy из меню Edit или нажатием Ctrl+C. Перед копированием объект нужно выделить.

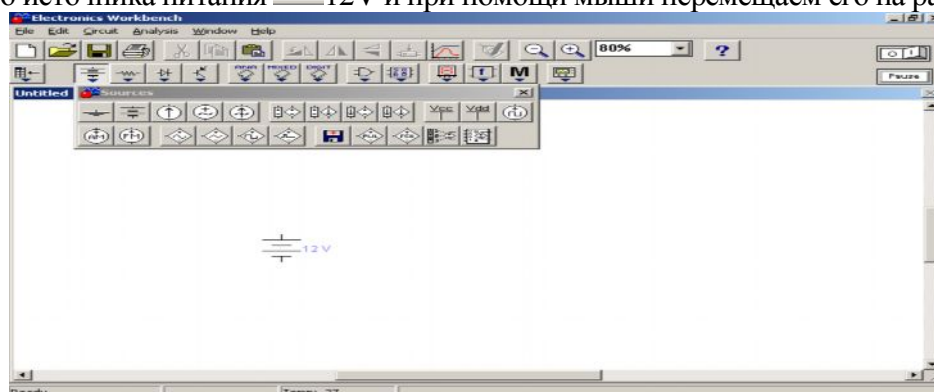
После выполнения команды выделенный объект копируется в буфер. Для вставки содержимого буфера на рабочее поле нужно выбрать команду Paste из меню Edit или нажать Ctrl+V. После выполнения команды содержимое буфера появится на рабочем поле и будет выделено цветом. Удаление объекта осуществляется командами Cut и Delete. Отличие состоит в том, что при выполнении команды Cut объект удаляется в буфер и может быть затем вставлен обратно на рабочее поле, а при выполнении команды Delete объект удаляется совсем. Перед удалением объект также должен быть выделен.

### Пример 1.

Рассмотрим построение простейшей электрической цепи с резистивным и индуктивным элементами в программе Electronics Workbench, а затем исследуем её работу при постоянном напряжении на входе цепи в установившемся режиме.

а) построение простейшей электрической цепи R, L.

На панели компонентов находим пиктограмму источников питания.  Нажатием левой кнопки мыши по выбранной пиктограмме получим поле компонентов, в котором появятся изображения различных видов источников питания. Выбираем изображение постоянного источника питания  12V и при помощи мыши перемещаем его на рабочее поле.

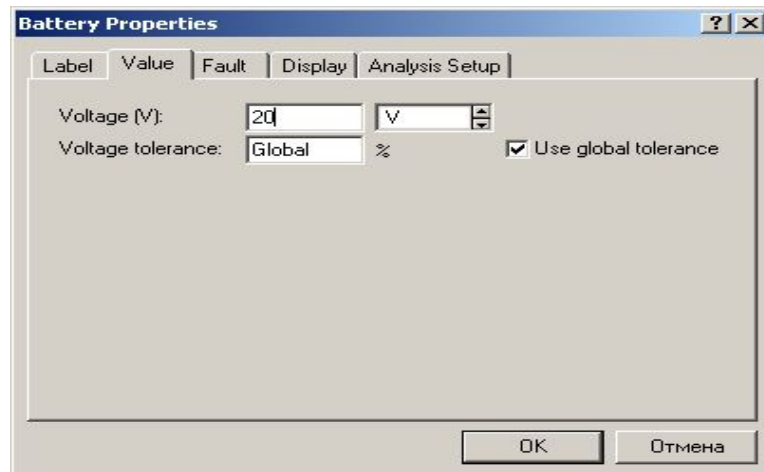



5.4.4. Установка значений параметров компонентов. Установка значений параметров компонентов производится в диалоговом окне свойств компонента, которое открывается двойным щелчком мыши по изображению компонента или командой Value из меню Circuit (при этом компонент должен быть выделен). В диалоговом окне помощи клавиатуры и мыши нужно ввести требуемые значения параметров компонента и нажать Accept или Cancel для подтверждений или отмены установки значений.

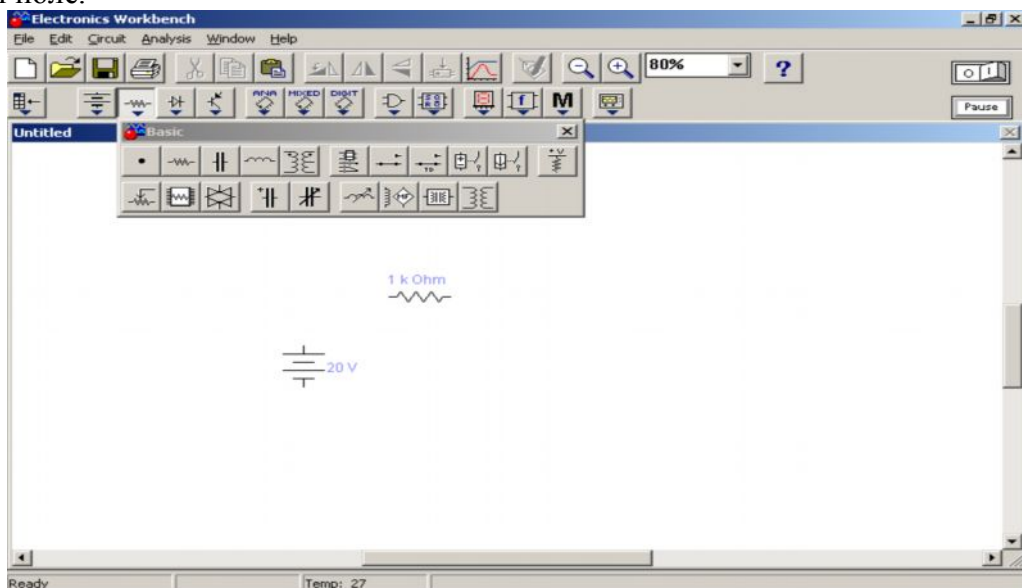
После построения схемы можно каждому компоненту присвоить позиционное обозначение или просто какое-либо имя. Это можно сделать при помощи команды Label из меню Circuit или нажатием Ctrl+L, предварительно выделив компонент. После этого откроется диалоговое окно, в котором нужно ввести обозначение или имя компонента и нажать клавишу Enter.

**Пример 1.** (продолжение).

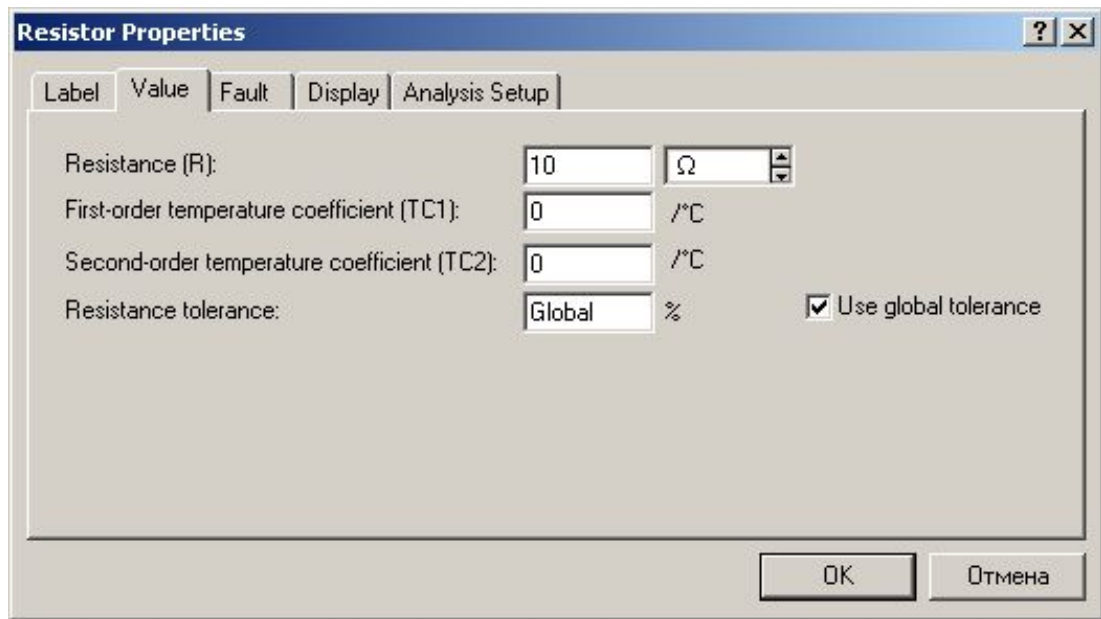
Двойным щелчком мыши по изображению постоянного источника питания открываем диалоговое окно свойств данного компонента. Устанавливаем необходимые значения параметров постоянного источника питания.



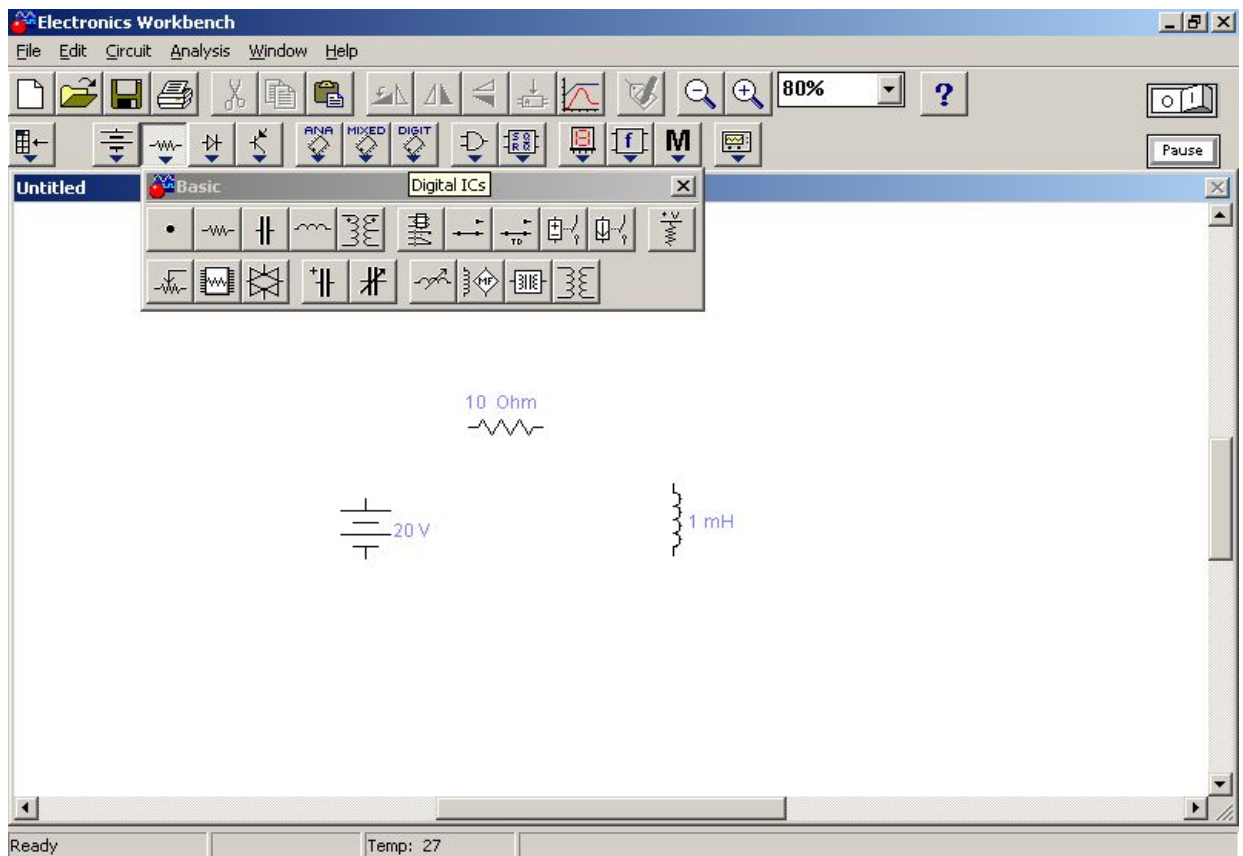
Продолжаем построение электрической схемы. Выделяем на панели компонентов пиктограмму элементов цепи . Выбираем резистивный элемент и устанавливаем его в рабочем поле.



Задаем значения параметров резистора.




Аналогично устанавливаем в рабочем окне индуктивный элемент.



Задаем значение его параметров.





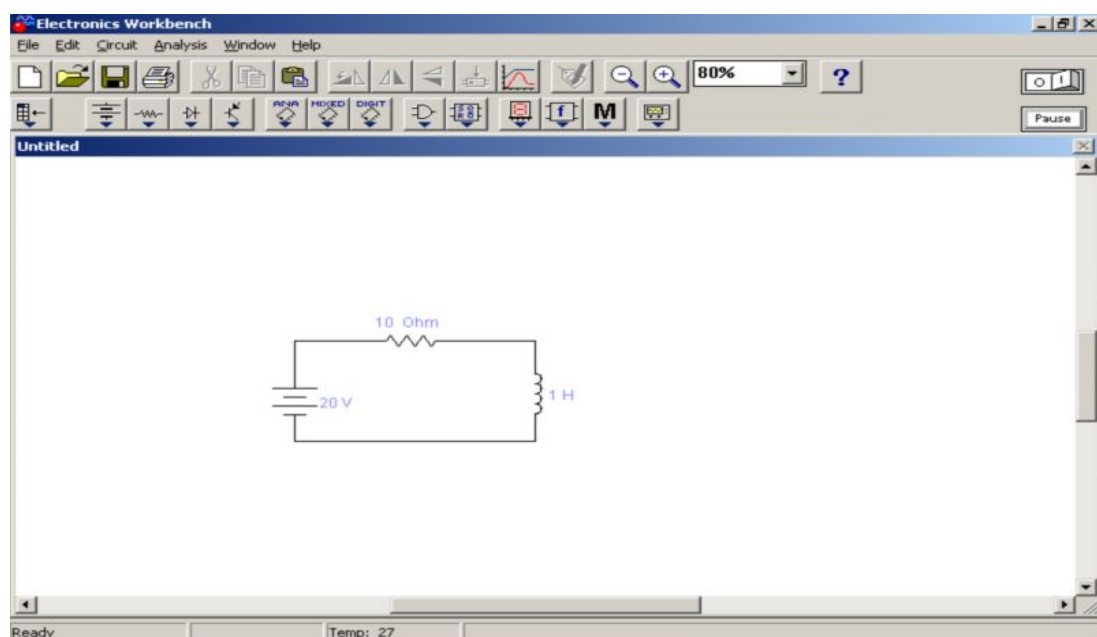
5.4.5. Перемещение объекта. Объект можно поворачивать на угол, кратный 90 градусам, предварительно его выделив, а затем используя программу  или Rotate из меню Circuit или нажать Ctrl+R. При этом объект повернется на 90 градусов по часовой стрелке. При повороте группы компонентов поворачивается каждый компонент, а не вся группа целиком.

5.4.6. Соединение компонентов схемы проводниками. Для соединения компонентов проводниками нужно подвести указатель мыши к выводу компонента. При этом на выводе компонента появится большая черная точка. Нажав левую кнопку мыши, переместите ее указатель к выводу компонента, с которым нужно соединиться, и отпустите кнопку мыши. Выводы компонентов соединятся проводником.

Все проводники в Electronics Workbench по умолчанию черного цвета, но цвет проводника можно изменить. Для этого нужно двойным щелчком на изображении проводника открыть окно, приведенное на рисунке, и в окне мышью выбрать требуемый цвет.

**Пример 1.** (продолжение).

Соединяем постоянный источник питания и элементы цепи.





5.4.7. Подключение приборов. В Electronics Workbench имеется семь приборов, формирующих различные воздействия и анализирующих реакцию схемы. Эти приборы представлены в виде пиктограмм, расположенных на панели инструментов.

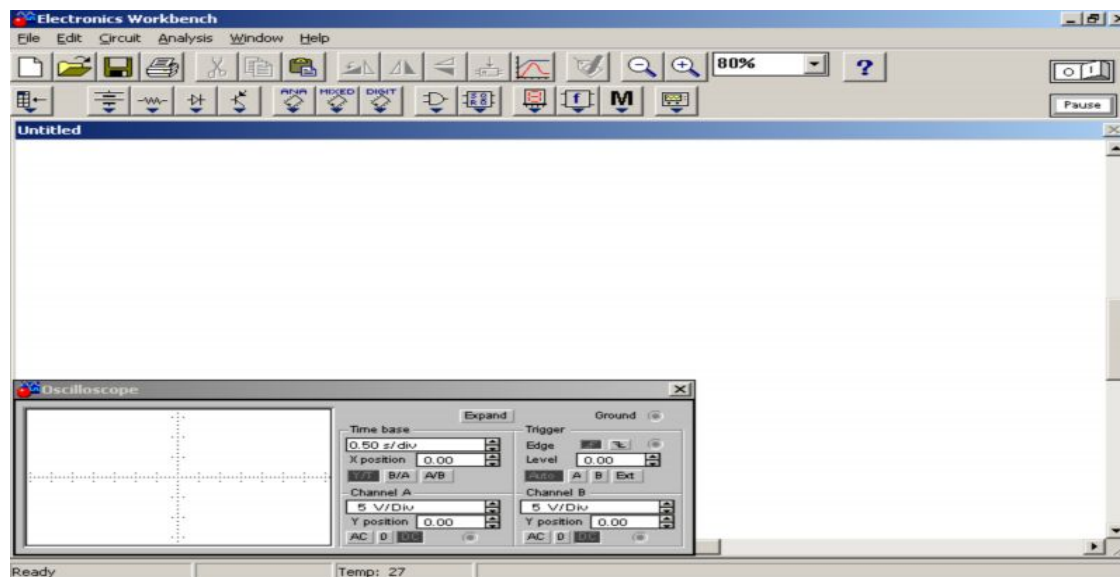
Для подключения прибора к схеме нужно мышью перетащить прибор с панели инструментов на рабочее поле и подключить выводы прибора к исследуемым точкам. Некоторые приборы нужно заземлять, иначе их показания будут неверными.

Расширенное изображение прибора выводится в окне, которое появляется после двойного щелчка мышью по уменьшенному изображению прибора или после выполнения команды Zoom из меню Circuit. Закрывать это окно можно командой Close из меню, появляющегося при щелчке на кнопке в левом верхнем углу окна. Также можно использовать комбинацию Alt+F4.

5.5. Осциллограф. На схему выводится уменьшенное изображение осциллографа, общее для обеих модификаций. На этом изображении, имеется четыре входных зажима:


- Верхний правый зажим – общий. (Вывод называют общим потому, что потенциал на этом выводе является общей точкой, относительно которой осциллограф измеряет напряжение. Обычно этот вывод заземляют, чтобы осциллограф измерял напряжение относительно нуля. Поэтому на панели осциллографа этот вывод обозначен «ground» ) .
  - Нижний правый - вход синхронизации, его назначение будет рассмотрено ниже.
  - Левый и правый нижние зажимы представляют собой соответственно вход канала A (channel A) и вход канала B (channel B).

5.5.1. Простая модификация осциллографа. Двойным щелчком мыши по уменьшенному изображению открывается изображение передней панели простой модели осциллографа с кнопками управления, информационными полями и экраном. Ниже приведен соответствующий рисунок.



Осциллограф имеет два канала (CHANNEL) A и B с отдельной регулировкой чувствительности в диапазоне от 10 мкВ/дел (mV/Div) до 5 кВ/дел (kV/Div) и регулировкой смещения по вертикали (Y POS). Выбор режима по входу осуществляется нажатием кнопок AC, V, DC. Режим AC предназначен для наблюдения только сигналов переменного тока (его еще называют режимом "закрытого входа", поскольку в этом режиме на входе усилителя включается

разделительный конденсатор, не пропускающий постоянную составляющую). В режиме 0 входной зажим замыкается на землю. В режиме DC (включен по умолчанию) можно проводить осциллографические измерения как постоянного, так и переменного тока. Этот режим еще называют режимом "открытого входа", поскольку входной сигнал поступает на вход вертикального усилителя непосредственно. С правой стороны от кнопки DC расположен входной зажим.

В режиме Y/T (обычный режим, включен по умолчанию) реализуются следующие режимы развертки: по вертикали — напряжение сигнала, по горизонтали — время; в режиме В/А: по вертикали — сигнал канала В, по горизонтали — сигнал канала А; в режиме А/В: по вертикали — сигнал канала А, по горизонтали — сигнал канала В. В режиме развертки Y/T длительность развертки (TIME BASE) может быть задан; в диапазоне от 0,1 нс/дел (ns/div) до 1 с/дел (s/div) с возможностью установки смещения в тех же единицах по горизонтали, т.е. по оси X (X POS). В режиме Y/T предусмотрен также ждущий режим (TRIGGER) с запуском развертки (EDGE) по переднему или заднему фронту запускающего сигнала (выбирается нажатием кнопок ) при регулируемом уровне (LEVEL) запуска а также в режиме AUTO (от канала А или В), от канала А, от канала В или от внешнего источника (EXT), подключаемого к зажиму в блоке управления TRIGGER. Названные режимы запуска развертки выбираются кнопками AUTO А В EXT. Заземление осциллографа осуществляется с помощью клеммы GROUND в правом верхнем углу прибора.



Настройка осциллографа. Для проведения измерений осциллограф нужно настроить, для чего следует задать:

1. расположение осей, по которым откладывается сигнал,
2. нужный масштаб развертки по осям,
3. смещение начала координат по осям,
4. режим работы по входу: закрытый или открытый,
5. режим синхронизации: внутренний или внешний.

Настройка осциллографа производится при помощи полей управления, расположенных на панели управления.

Панель управления. Панель управления имеет общий для обеих модификаций осциллографа вид и разделена на четыре поля управления:


1. Поле управления горизонтальной разверткой (масштабом времени).
2. Поле управления синхронизацией (запуском).
3. Поле управления каналом А.
4. Поле управления каналом В.

Управление масштабom времени. Поле управления горизонтальной разверткой (масштабом времени) служит для задания масштаба горизонтальной оси осциллографа при наблюдении напряжения на входах каналов А и В в зависимости от времени. Временной масштаб задается в с/дел, мс/дел, мкс/дел, нс/дел (s/div, ms/div,  $\mu$ s/div, ns/div соответственно). Величина одного деления может быть установлена от 0,1 нс до 1с. Масштаб может дискретно уменьшаться на один шаг при щелчке мышью на кнопке  И справа от поля и увеличиваться при щелчке на кнопке .

Чтобы получить удобное для наблюдения изображение на экране осциллографа, установите масштаб времени таким образом, чтобы цена двух делений на горизонтальной оси примерно была равна величине, обратно пропорциональной частоте исследуемого сигнала, т. е. составляла бы период сигнала.

*Например: Если Вы хотите исследовать сигнал с частотой 1 KHz, установите масштаб времени равным 0,05 ms.*



С помощью кнопок , расположенных в поле строки X POS, можно дискретно сдвигать начало осциллограммы по горизонтальной оси. В этом же поле расположены три кнопки: Y/T, A/B, B/A, позволяющие задавать вид зависимости отображаемых сигналов. При нажатии на кнопку Y/T по вертикальной оси откладывается напряжение, по горизонтальной оси - время, при нажатии на кнопку A/B по вертикальной оси откладывается амплитуда напряжения на входе канала А, по горизонтальной оси - канала В и при нажатии на кнопку В/А наоборот. При этом масштаб осей определяется установками соответствующих каналов. В режимах А/В и В/А можно наблюдать частотные и фазовые сдвиги (фигуры Лиссажу), петли гистерезиса, вольтамперные характеристики и т. д.

Управление каналами А и В. Две нижних части панели осциллографа являются полями управления отображением сигналов, поданных на входы каналов А и В соответственно. Верхнее окно в поле позволяет управлять масштабом оси отображаемого напряжения по вертикальной или горизонтальной оси. Цена деления может дискретно устанавливаться от 10mv/div до 5 Kv/div. Масштаб для каждой оси устанавливается отдельно. Чтобы получить удобное для работы изображение на экране осциллографа перед началом эксперимента, установите масштаб, соответствующий ожидаемому напряжению.

■ *Например:* При подаче на вход переменного сигнала амплитудой 3 вольта установите масштаб вертикальной оси  $Y$  1 V/div.

Ниже расположено поле, которое позволяет дискретно сдвигать ось X вверх или вниз. Для того, чтобы развести изображения от каналов А и В, воспользуйтесь сдвигом по оси Y (Y POS) для одного или двух каналов.

Три нижние кнопки реализуют различные режимы работы входа осциллографа по входу. Режим работы осциллографа с закрытым входом устанавливается нажатием на кнопку AC. В этом режиме на вход не пропускается постоянная составляющая сигнала. При нажатии на кнопку DC осциллограф переходит в режим с открытым входом. В этом режиме на вход осциллографа пропускается как постоянная, так и переменная составляющая сигнала. При нажатии на кнопку O вход осциллографа соединяется с общим выводом осциллографа, что позволяет определить положение нулевой отметки по оси Y.

Осциллограф имеет четыре режима синхронизации:

- Автоматический режим (AUTO) - запуск осциллограммы производится автоматически при подключении осциллографа к схеме или при её включении. Когда "луч" доходит до конца экрана, осциллограмма снова прописывается с начала экрана (новый экран).
- Режимы запуска по входу "А" или "В", в которых запускающим сигналом является сигнал, поступающий на соответствующий вход.
- Режим "Внешний запуск" (EXT - external). В этом случае сигналом запуска является сигнал, подаваемый на вход синхронизации.


*Совет:* Если Вы не видите сигнала на осциллографе или сигнал слабый -нажмите кнопку AUTO.

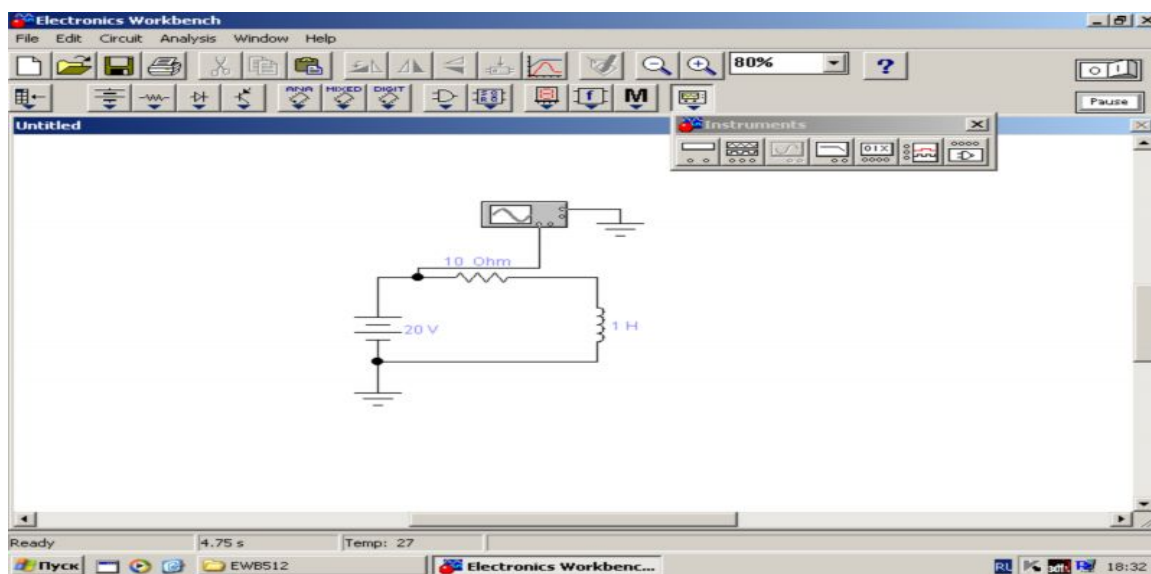
5.5.2. Расширенная модификация осциллографа. Нажатие клавиши ZOOM на панели простой модели открывает окно расширенной модели осциллографа. Панель расширенной модели осциллографа в отличие от простой модели расположена под экраном и дополнена тремя информационными табло, на которые выводятся результаты измерений. Кроме того, непосредственно под экраном находится линейка прокрутки, позволяющая наблюдать любой временной отрезок процесса от момента включения до момента выключения схемы.

Для этого нажмите кнопку Save (Сохранить) и в диалоговом окне введите имя файла. Файлу присваивается расширение \*.scr. Он представляет собой текстовый файл в ASCII кодах, в котором записаны данные о значениях напряжений в точках подключения осциллографа через интервал времени, равный масштабу горизонтальной развертки. Изображение можно инвертировать нажатием кнопки REVERSE. Возврат к исходному состоянию осциллографа — нажатием кнопки REDUCE.

Можно подключить осциллограф к уже включённой схеме или во время работы схемы переставить выводы к другим точкам - изображение на экране осциллографа изменится автоматически.

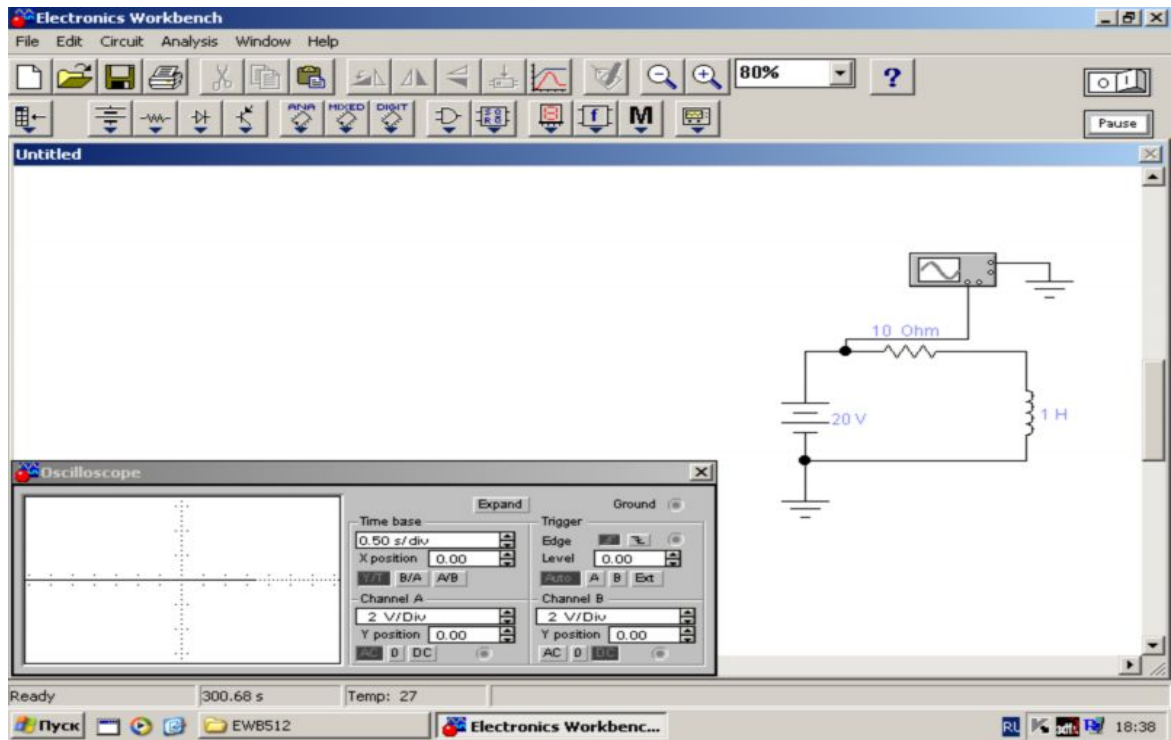
### Пример (продолжение)

На панели компонентов левой кнопкой мыши выделяем пиктограмму . Выбираем из поля компонентов осциллографа и устанавливаем его в рабочем окне. Подключаем к готовой электрической цепи.



б) Исследование работы простейшей электрической цепи с резистивными и индуктивными элементами в установившемся режиме при постоянном напряжении на входе цепи.

Открываем изображение передней панели простой модификации осциллографа. Проводим его настройку. Нажимаем выключатель в правом верхнем углу окна программы и наблюдаем установившейся процесс работы цепи.

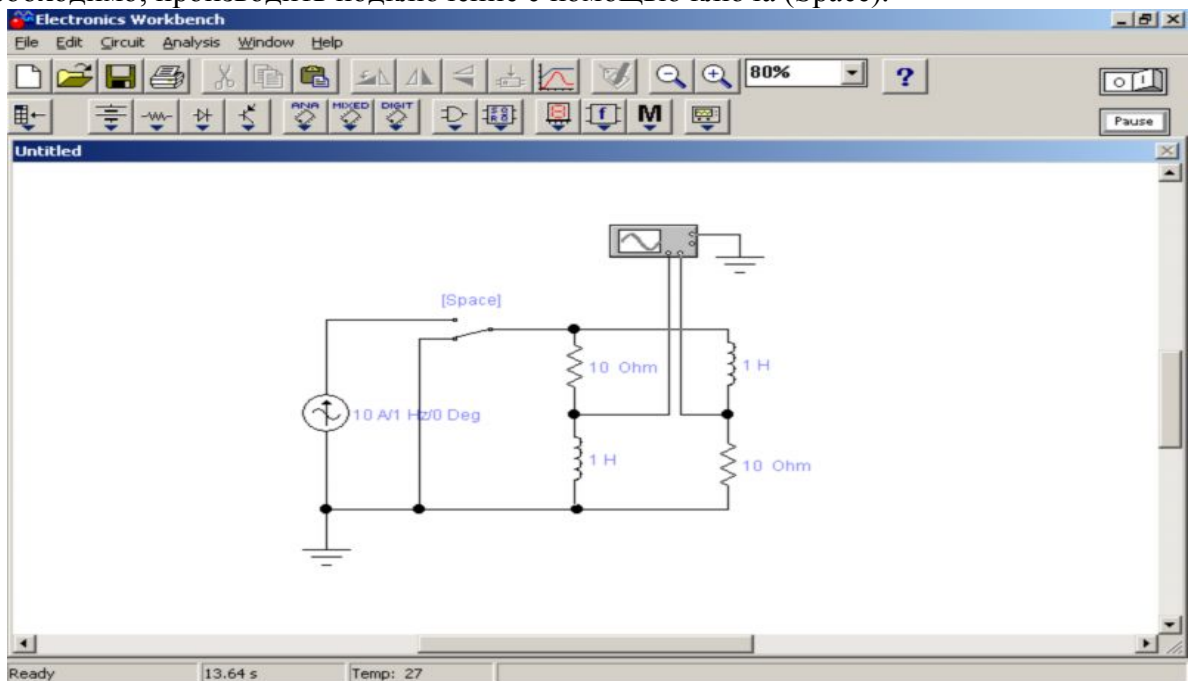


Затем открываем расширенную модификацию осциллографа и исследуем работу цепи более подробно. Полученные результаты выводим на печать и сравниваем с расчетными значениями.

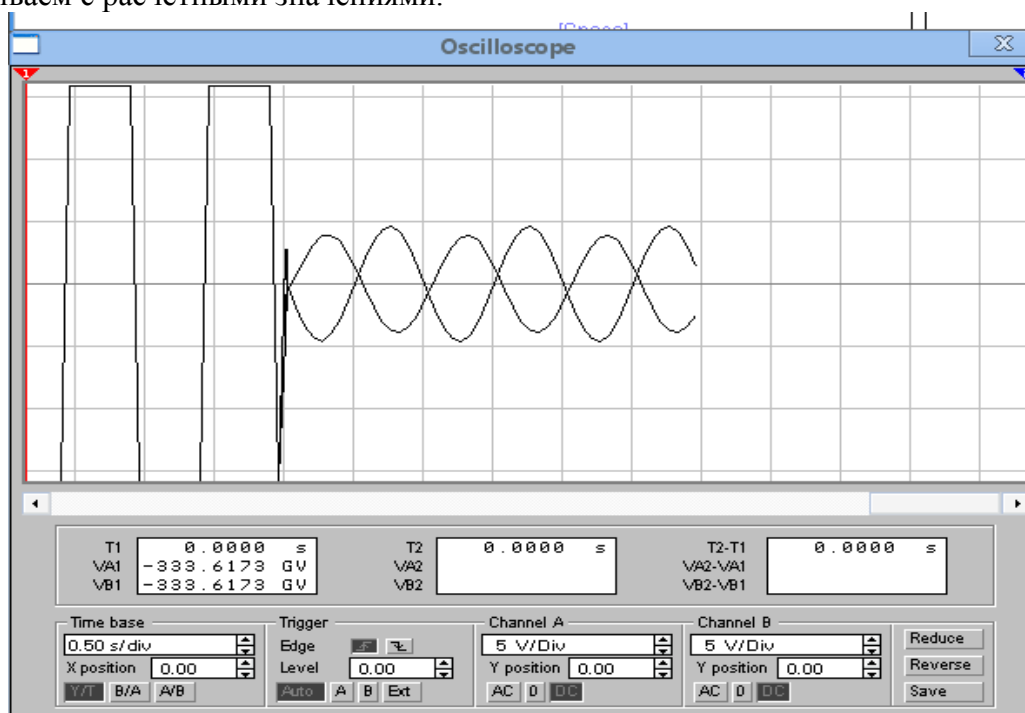
## Пример 2.

Исследование работы простейшей электрической цепи с резистивными индуктивными элементами в режиме включения при переменном напряжении на входе цепи.

Для прохождения переходного процесса в заданной электрической цепи необходимо, производить подключение с помощью ключа (Space).



Открываем расширенную модификацию осциллографа и подробно исследуем переходный процесс в цепи. Полученные результаты так же выводим на печать и сравниваем с расчетными значениями.



### **Порядок выполнения работы.**

1. Построить простейшие электрические цепи;
  - с резистивным и индуктивным элементам;
  - с резистивным и емкостным элементам;
  - с последовательным соединением резистора, конденсатора и катушки индуктивности,для исследования проходящих в названных цепях переходных процессов в режимах включения и отключения при постоянном и переменном напряжении на входе цепи.
2. Получить на осциллографе соответствующие графики зависимостей тока и напряжения от времени.

### **Литература.**

1. А. С. Касаткин «Электротехника». «Энергия» М. 1984 г.
2. И. Е. Тамм «Основы теории электричества». Изд. «наука» 1976 г.
3. А. Д. Нестеренко «Введение в теоретическую электротехнику». Киев 1969г.
4. Мартин «Физические основы электротехники». М. 1969г.
5. Правила устройства электроустановок. М. 1986 г.
6. Л. Д. Рожкова, В.С. Козулин «Электрооборудования станций и подстанций». М.1987 г.
7. Г. И. Атабеков «Теория линейных электрических цепей». М. 1960 г.
8. А. А. Васильев «Электрическая часть станций и подстанций». 1990 г.
9. Б. Н. Неклепаев «Справочное пособие для курсового и дипломного проектирования». 1989 г.
10. Волынский.Б.А. и др. Электротехника, Б.А.Волынский, Е.Н.Зейн, В.Е.Шатерников; Учеб.пособие для вузов.-М.: Энергоатомиздат, 1987.-528с.:ил.

Приложение 1.

Вариант	Номинальное сечение провода АС, мм <sup>2</sup>	D <sub>ср</sub> , м	U <sub>ном</sub> , кВ.	I <sub>н</sub> , А	L, км	Частота эл. поля, Гц			t <sub>окр</sub> , °С
						f <sub>1</sub>	f <sub>2</sub>	f <sub>3</sub>	
1	50/8	1,0	10	0,8I <sub>доп.</sub>	3	0	50	500	23
2	95/16	3,5	35	0,5I <sub>доп.</sub>	15	2	50	300	18
3	300/66	8,0	220	I <sub>доп.</sub>	40	1	50	600	10
4	35/6,2	1,5	10	0,7I <sub>доп.</sub>	6	2	50	600	25
5	70/11	1,0	10	0,6I <sub>доп.</sub>	2	5	50	800	24
6	120/19	6,5	150	0,5I <sub>доп.</sub>	28	1	50	100	15
7	300/19	6,5	330	0,7I <sub>доп.</sub>	37	0	50	100	8
8	185/29	4	35	0,6I <sub>доп.</sub>	12	4	50	800	17
9	150/24	1	10	0,5I <sub>доп.</sub>	3	2	50	200	22
10	120/19	1	10	0,5I <sub>доп.</sub>	2	9	50	400	34
11	240/56	5	220	0,9I <sub>доп.</sub>	49	12	50	600	10
12	240/56	5	110	0,8I <sub>доп.</sub>	35	7	50	300	7
13	400/93	8	500	0,7I <sub>доп.</sub>	54	1	50	300	40
14	500/64	8	750	0,5I <sub>доп.</sub>	65	9	50	600	26
15	450/56	6,5	150	0,6I <sub>доп.</sub>	45	0	50	800	29
16	240/39	5	110	0,7I <sub>доп.</sub>	52	5	50	100	16
17	330/43	6,5	150	0,8I <sub>доп.</sub>	38	5	50	600	28
18	400/51	6,5	750	0,9I <sub>доп.</sub>	47	0	50	800	30
19	70/11	3,5	35	0,5I <sub>доп.</sub>	26	0	60	400	3
20	95/16	4	35	0,6I <sub>доп.</sub>	27	1	60	300	14
21	240/32	7	110	0,8I <sub>доп.</sub>	46	1	60	800	15
22	150/24	1	10	0,9I <sub>доп.</sub>	4	0	60	400	27
23	120/19	1	10	0,8I <sub>доп.</sub>	14	2	60	100	28

24	185/29	3,5	35	0,4I <sub>доп.</sub>	23	3	60	600	22
25	400/93	6	500	0,2I <sub>доп.</sub>	42	4	60	200	4
26	400/51	8	500	0,5I <sub>доп.</sub>	39	2	60	300	9
27	240/32	5	110	0,6I <sub>доп.</sub>	29	1	60	400	10
28	240/56	5	110	0,7I <sub>доп.</sub>	48	0	60	600	13
29	330/43	7	330	0,8I <sub>доп.</sub>	57	1	60	100	27
30	150/34	4	35	0,9I <sub>доп.</sub>	25	0	60	800	30
31	185/128	7	110	0,8I <sub>доп.</sub>	44	1	60	400	35
32	50/8	1	10	0,5I <sub>доп.</sub>	3	0	60	300	22
33	240/32	7	220	0,9I <sub>доп.</sub>	52	0	60	200	6
34	50/8	1	35	0,8I <sub>доп.</sub>	3	6	60	200	20
35	70/11	2	110	0,7I <sub>доп.</sub>	2	1	60	100	15
36	95/16	5	110	0,6I <sub>доп.</sub>	2	3	60	600	13
37	500/64	2	750	I доп	18	0	50	300	19
38	300/39	5	500	0,7 I доп	16	3	50	300	18
39	185/29	6,5	220	0,5 I доп	36	3	50	200	10
40	240/32	3,5	330	0,6 I доп	17	1	50	200	5
41	120/19	8	110	0,5 I доп	19	4	60	400	7
42	150/24	4	220	0,5 I доп	21	0	50	600	12
43	240/56	3,5	330	0,9 I доп	24	5	60	150	9
44	500/64	4	750	I доп	38	0	60	150	6
45	300/66	1	500	I доп	41	0	60	200	23
46	400/51	1	500	0,7 I доп	43	6	50	800	15
47	185/29	5	220	0,8 I доп	50	5	60	800	14
48	330/43	1,5	330	0,8 I доп	9	4	60	600	2
49	95/16	6,5	110	0,7 I доп	11	2	50	400	3
50	70/11	2	35	0,9 I доп	15	1	50	200	8



**Погонные активные сопротивления алюминиевых и сталеалюминиевых проводов**

Марка про- вода	Масса I <sub>км</sub> провода, кг	Наружный диаметр провода, мм	Длительно допустимый ток нагрузки, А		Погонное активное сопротив- ление R <sub>0</sub> , Ом/км
			Вне помещений	Внутри помещении	
<b>Алюминиевые провода</b>					
A 16	44	5,1	105	75	1,98
A 25	68	6,4	135	105	1,28
A 35	95	7,5	170	130	0,92
A 50	136	9,0	215	165	0,64
A 70	191	10,7	265	210	0,46
A 95	257	12,4	320	255	0,34
A 120	322	14,0	375	300	0,27
A 150	407	15,8	440	355	0,21
A 185	503	17,5	500	410	0,17
<b>Сталеалюминиевые провода</b>					
AC 10	36	4,4	80	50	3,120
AC 16	62	5,4	105	75	2,060
AC 25	92	6,6	130	100	1,38
AC 35	150	8,4	175	135	0,850
AC 50	196	9,6	210	165	0,650
AC 70	275	11,4	265	210	0,460
AC 95	386	13,5	330	260	0,33
AC 120	492	15,2	380	305	0,270
AC 150	617	17,0	445	360	0,210
AC 185	771	19,0	510	425	0,170
AC 240	937	21,6	605	505	0,130
AC 300	1098	23,5	690	580	0,108
AC 400	1501	27,2	825	710	0,080
AC 500	1838	30,2	945	815	0,065
AC 600	2206	33,1	1050	920	0,055
ACO 700	2756	37,1	1220	1075	0,044
ACU 120	530	15,5	375	-	0,288
ACU 150	678	17,6	450	-	0,210
ACU 185	850	19,6	515	-	0,170
ACU 240	1111	22,4	610	-	0,131
ACU 300	1392	25,2	705	-	0,106
ACU 400	1840	29,0	850	-	0,079