

### 8.2.2. Цепи синусоидального тока с конденсатором

В цепи переменного тока конденсатор проводит электрический ток в результате циклической перезарядки.

Ток в цепи, содержащей конденсатор, опережает напряжение по фазе на  $90^\circ$  (Рис. 8.2.2-1)

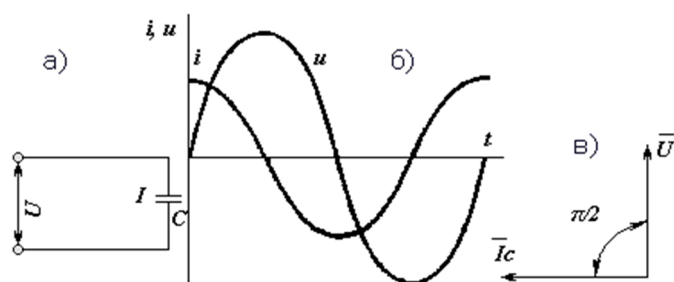


Рис. 8.2.2-1

Реактивное сопротивление конденсаторов вычисляется по формуле  $X_C = 1 / 2\pi fC = 1 / \omega C$ . Как видно из формулы, величина реактивного сопротивления зависит от частоты.

Во время перезарядки в конденсаторе происходит циркуляция энергии. Если рассмотрим положительный или отрицательный полупериод, можно заметить, что на протяжении четверти периода электрическая энергия запасается в электрическом поле конденсатора, а на протяжении следующей четверти периода энергия вновь возвращается в сеть. В силу этого конденсатор называют реактивным элементом, а его сопротивление  $X_C$  является реактивным, в отличие от активного сопротивления резистора  $R$ .

Интенсивность обмена энергии принято характеризовать наибольшей скоростью поступления энергии в электрическое поле конденсатора, называемое реактивной мощностью.

В общем случае выражение для реактивной мощности имеет вид:

$$Q = UI \sin \varphi \quad (1)$$

Когда ток опережает напряжение (емкостная нагрузка,  $\varphi < 0$ ) эта величина отрицательна. Единицу реактивной мощности называют вольт-ампер реактивной (ВАр).

#### Рабочее задание

Для выполнения лабораторной работы необходимо выбрать в меню строку "Цепи синусоидального тока с конденсатором", в правом нижнем углу открывшейся лицевой панели представлены подробные инструкции по выполнению.

Подключить цепь к генератору синусоидального напряжения.

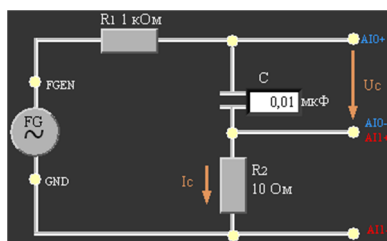


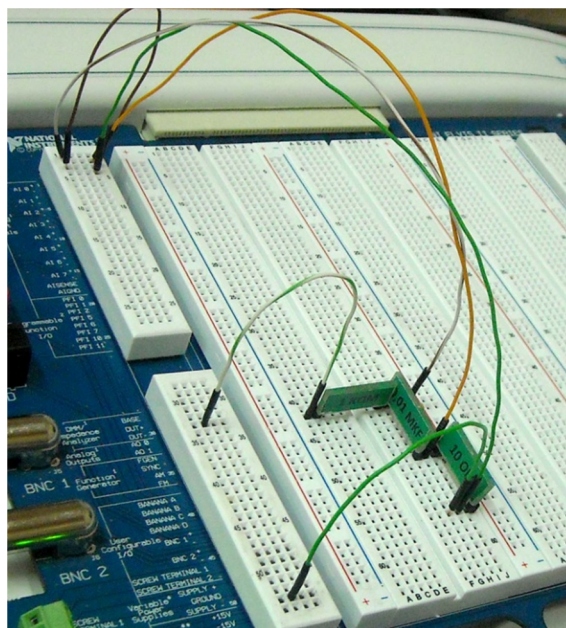
Рис. 8.2.2-2

Измерить фазовый сдвиг между током и напряжением конденсатора.

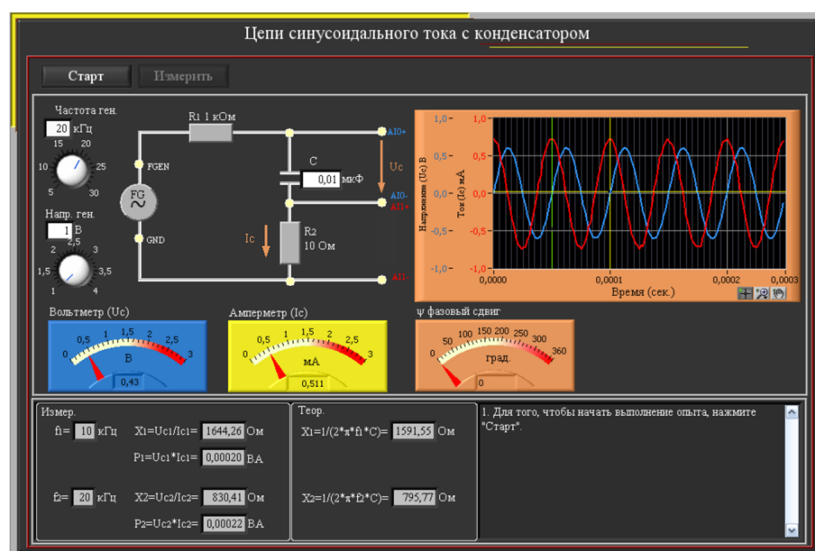
Рассчитать реактивное сопротивление конденсатора при разных частотах генератора.

Рассчитать реактивную мощность

Собрать на макетной плате NI ELVIS II схему согласно Рис. 8.2.2-2:



После проведения опыта лицевая панель примет следующий вид:





### 8.2.3. Последовательное соединение конденсаторов

В цепи переменного тока конденсатор проводит электрический ток в результате циклической перезарядки.

Ток в цепи, содержащей конденсатор, опережает напряжение по фазе на  $90^\circ$  (Рис. 8.2.3-1)

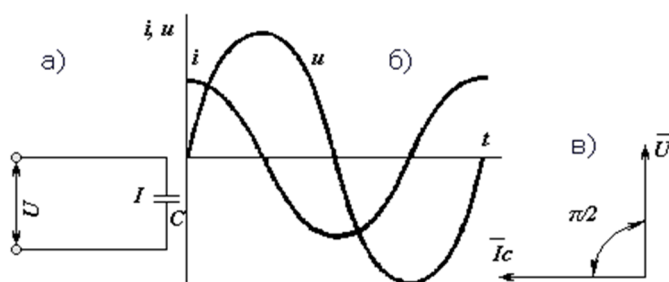
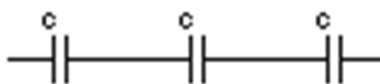


Рис. 8.2.3-1

Реактивное сопротивление конденсаторов вычисляется по формуле  $X_c = 1 / 2\pi f c = 1 / \omega c$ . Как видно из формулы, величина реактивного сопротивления зависит от частоты.



При последовательном соединении  $k$  конденсаторов складываются обратные емкостям величины:

$$1/C = 1/C_1 + 1/C_2 + \dots + 1/C_k \quad (1)$$

Во время перезарядки в конденсаторе происходит циркуляция энергии. Если рассмотрим положительный или отрицательный полупериод, можно заметить, что на протяжении четверти периода электрическая энергия запасается в электрическом поле конденсатора, а на протяжении следующей четверти периода энергия вновь возвращается в сеть. В силу этого конденсатор называют реактивным элементом, а его сопротивление  $X_c$  является реактивным, в отличие от активного сопротивления резистора  $R$ .

#### Рабочее задание

Для выполнения лабораторной работы необходимо выбрать в меню строку "Последовательное соединение конденсаторов", в правом нижнем углу открывшейся лицевой панели представлены подробные инструкции по выполнению.

Подключить цепь к генератору синусоидального напряжения, согласно Рис. 8.2.3-2.

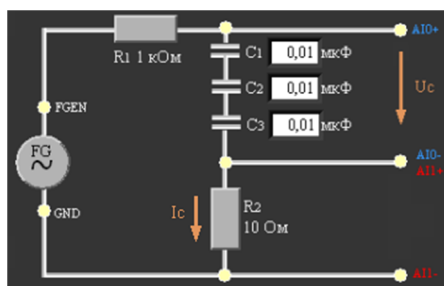
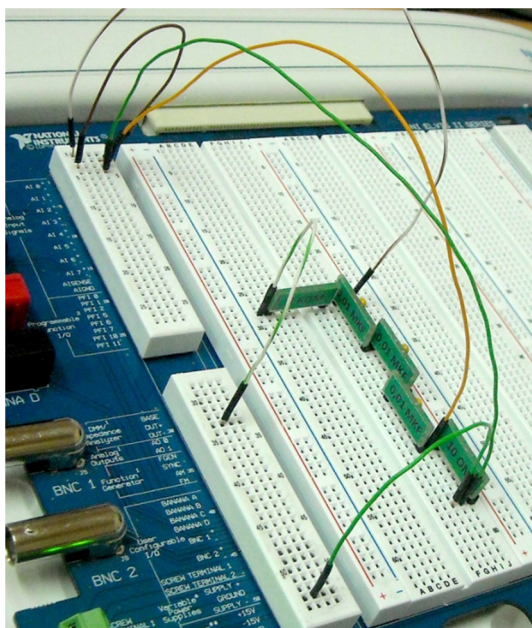


Рис. 8.2.3-2

Рассчитать реактивное сопротивление батареи последовательно соединенных конденсаторов, рассчитать величину емкости и проверить правильность соответствия суммарной величины.

Собрать на макетной плате NI ELVIS II схему согласно Рис. 8.2.3-2:



После проведения опыта лицевая панель примет следующий вид:



#### 8.2.4. Параллельное соединение конденсаторов

В цепи переменного тока конденсатор проводит электрический ток в результате циклической перезарядки.

Ток в цепи, содержащей конденсатор, опережает напряжение по фазе на  $90^\circ$  (Рис. 8.2.4-1)

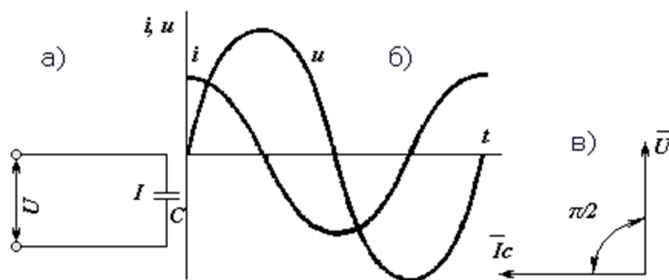
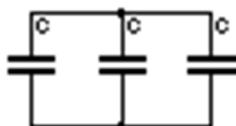


Рис. 8.2.4-1

Реактивное сопротивление конденсаторов вычисляется по формуле  $X_C = 1 / 2\pi fC = 1 / \omega C$ . Как видно из формулы, величина реактивного сопротивления зависит от частоты.

Конденсаторы могут быть подключены последовательно или параллельно.



При параллельном соединении  $k$  конденсаторов полная емкость равна сумме емкостей отдельных конденсаторов:

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_k \quad (1)$$

Во время перезарядки в конденсаторе происходит циркуляция энергии. Если рассмотрим положительный или отрицательный полупериод, можно заметить, что на протяжении четверти периода электрическая энергия запасается в электрическом поле конденсатора, а на протяжении следующей четверти периода энергия вновь возвращается в сеть. В силу этого конденсатор называют реактивным элементом, а его сопротивление  $X_C$  является реактивным, в отличие от активного сопротивления резистора  $R$ .

Интенсивность обмена энергии принято характеризовать наибольшей скоростью поступления энергии в электрическое поле конденсатора, называемое реактивной мощностью.

В общем случае выражение для реактивной мощности имеет вид:

$$Q = UI \sin \varphi \quad (2)$$

Когда ток опережает напряжение (емкостная нагрузка,  $\varphi < 0$ ) эта величина отрицательна. Единицу реактивной мощности называют вольт-ампер реактивной (ВАр).

#### Рабочее задание

Для выполнения лабораторной работы необходимо выбрать в меню строку "Параллельное соединение конденсаторов", в правом нижнем углу открывшейся лицевой панели представлены подробные инструкции по выполнению.

Подключить цепь к генератору синусоидального напряжения, согласно Рис. 8.2.4-2.

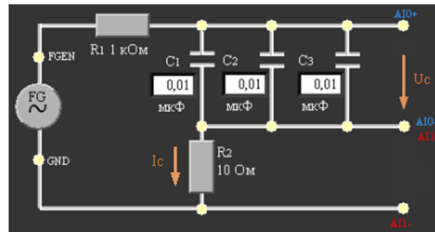
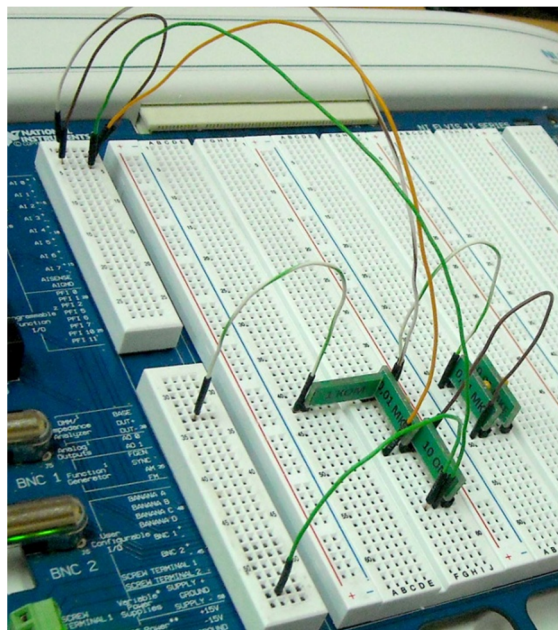


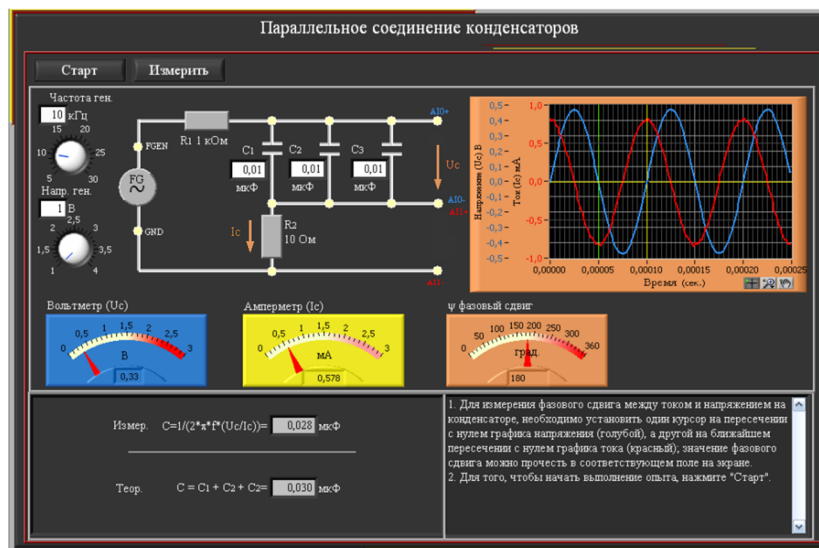
Рис. 8.2.4-2

Рассчитать реактивное сопротивление батареи параллельно соединенных конденсаторов, рассчитать величину емкости и проверить правильность соответствия суммарной величине.

Собрать на макетной плате NI ELVIS II схему согласно Рис. 8.2.4-2:



После проведения опыта лицевая панель примет следующий вид:



### 8.2.5. Напряжение и ток катушки индуктивности

Катушка индуктивности или дроссель являются индуктивными накопителями энергии, в которых энергия электрического тока преобразуется в энергию магнитного поля. Вокруг проводника с током образуется магнитное поле, пропорциональное количеству витков в катушке индуктивности.

При включении, выключении, или изменении тока в электрической цепи вследствие пересечения проводника собственным магнитным полем в нем индуцируется э.д.с. самоиндукции, имеющая реактивный характер. Изменение тока в катушке индуктивности не может быть мгновенным. При увеличении тока э.д.с. самоиндукции будет направлена против э.д.с. источника напряжения, и по этой причине ток в электрической цепи не может установиться сразу. Наоборот, при уменьшении тока в цепи индуцируется э.д.с. самоиндукции, препятствующая убыванию тока.

Таким образом, катушка в цепи переменного тока оказывает ему сопротивление в результате наведенной переменной электродвижущей силы самоиндукции. Это сопротивление называется реактивным, и обозначается  $X_L$ . На реактивном сопротивлении, в отличие от активного, не рассеивается тепловая энергия, а лишь запасается энергия магнитного поля.

Реактивное сопротивление индуктивности вычисляется по формуле  $X_L = 2\pi fL = \omega L$ . Как видно из формулы, величина реактивного сопротивления зависит от частоты.

Через индуктивность будет проходить переменный ток отстающий по фазе от приложенного напряжения на  $90^\circ$  (Рис. 8.2.5-1).

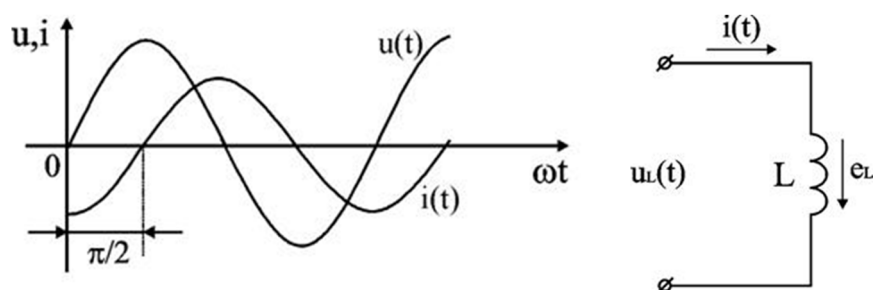


Рис. 8.2.5-1

Уравнение, выражающее связь между током и напряжением в индуктивности имеет вид:

$$u_L(t) = \omega L I_{mL} \cos(\omega t + 90^\circ) \quad (1)$$

Интенсивность обмена энергии принято характеризовать наибольшей скоростью поступления энергии в магнитное поле катушки, называемое реактивной мощностью.

В общем случае выражение для реактивной мощности имеет вид:

$$Q = UI \sin \varphi \quad (2)$$

Когда ток отстает от напряжения (индуктивная нагрузка,  $\varphi > 0$ ), эта величина положительна. Единицу реактивной мощности называют вольт-ампер реактивной (ВАр).

#### Рабочее задание

Для выполнения лабораторной работы необходимо выбрать в меню строку "Напряжение и ток катушки индуктивности", в правом нижнем углу открывшейся лицевой панели представлены подробные инструкции по выполнению.

Подключить цепь к генератору синусоидального напряжения, согласно Рис. 8.2.5-2.

Измерить фазовый сдвиг между током и напряжением на индуктивности. Рассчитать реактивное сопротивление индуктивности при разных частотах генератора. Рассчитать реактивную мощность.

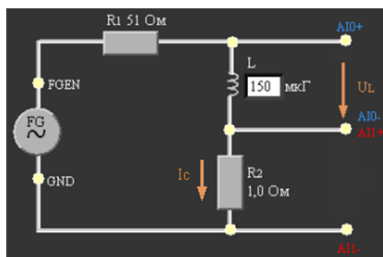
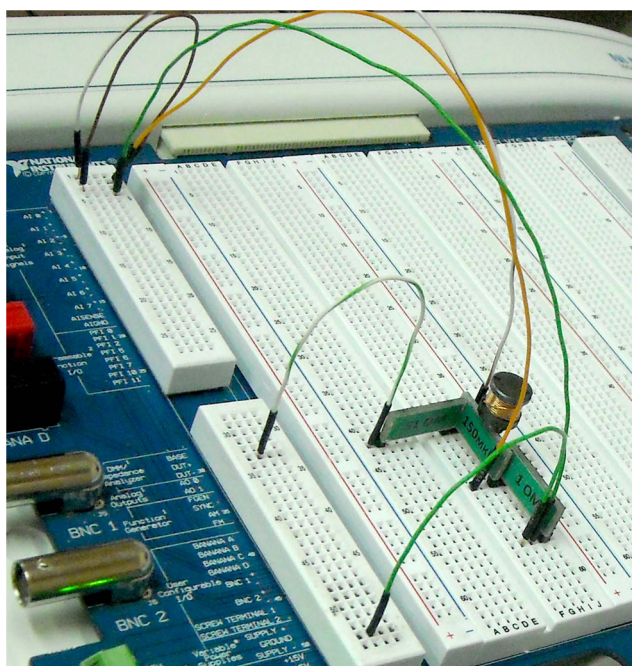
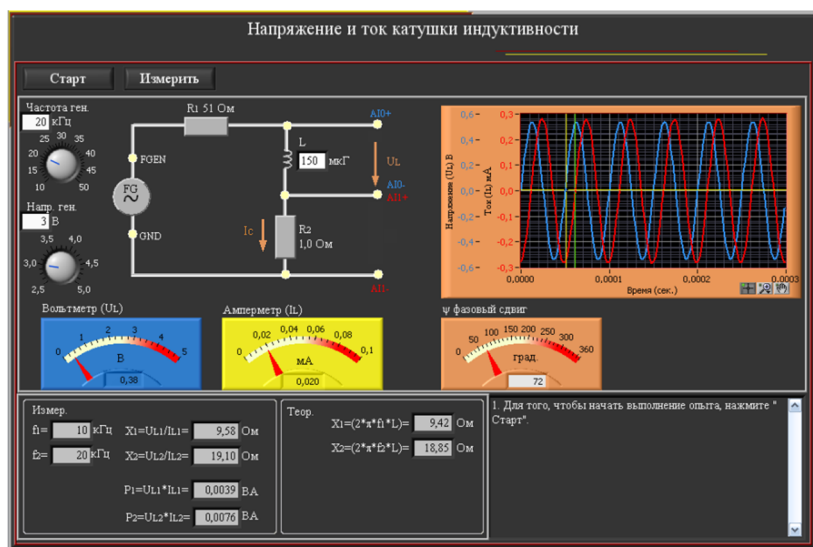


Рис. 8.2.5-2

Собрать схему на макетной плате NI ELVIS II согласно Рис. 8.2.5-2:



После проведения опыта лицевая панель примет следующий вид:





### 8.2.6. Последовательное соединение катушек индуктивности

Катушка индуктивности или дроссель являются индуктивными накопителями энергии, в которых энергия электрического тока преобразуется в энергию магнитного поля. Вокруг проводника с током образуется магнитное поле, пропорциональное количеству витков в катушке индуктивности.

При включении, выключении, или изменении тока в электрической цепи вследствие пересечения проводника собственным магнитным полем в нем индуцируется э.д.с. самоиндукции, имеющая реактивный характер. Изменение тока в катушке индуктивности не может быть мгновенным. При увеличении тока э.д.с. самоиндукции будет направлена против э.д.с. источника напряжения, и по этой причине ток в электрической цепи не может установиться сразу. Наоборот, при уменьшении тока в цепи индуцируется э.д.с. самоиндукции, препятствующая убыванию тока.

Таким образом, катушка в цепи переменного тока оказывает ему сопротивление в результате наведенной переменной электродвижущей силы самоиндукции. Это сопротивление называется реактивным, и обозначается  $X_L$ . На реактивном сопротивлении, в отличие от активного, не рассеивается тепловая энергия, а лишь запасается энергия магнитного поля.

Реактивное сопротивление индуктивности вычисляется по формуле  $X_L = 2\pi fL = \omega L$ . Как видно из формулы, величина реактивного сопротивления зависит от частоты.

Через индуктивность будет проходить переменный ток отстающий по фазе от приложенного напряжения на  $90^\circ$  (Рис. 8.2.6-1).

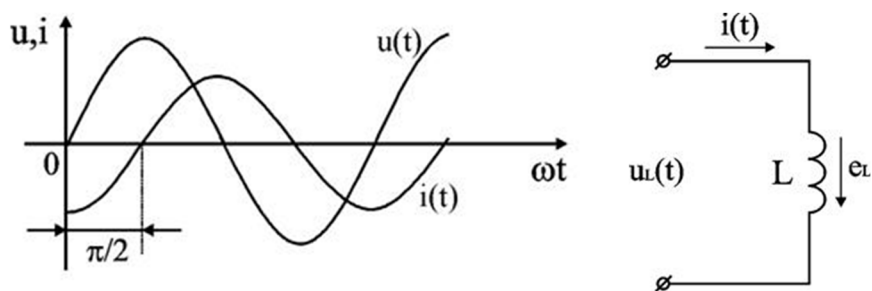


Рис. 8.2.6-1

Уравнение, выражающее связь между током и напряжением в индуктивности имеет вид:

$$u_L(t) = \omega L I_{mL} \cos(\omega t + 90^\circ) \quad (1)$$

При последовательном соединении индуктивностей  $L_1, L_2, L_3, \dots$  общую индуктивность цепи  $L$  можно определить из выражения:

$$L = L_1 + L_2 + L_3 + \dots \quad (2)$$

#### Рабочее задание

Для выполнения лабораторной работы необходимо выбрать в меню строку "Последовательное соединение катушек индуктивности", в правом нижнем углу открывшейся лицевой панели представлены подробные инструкции по выполнению.

Подключить цепь к генератору синусоидального напряжения, согласно Рис. 8.2.6-2.

Рассчитать реактивное сопротивление индуктивности. Рассчитать реактивное сопротивление батареи последовательно соединенных катушек, рассчитать величину индуктивности и проверить правильность суммарной величины.

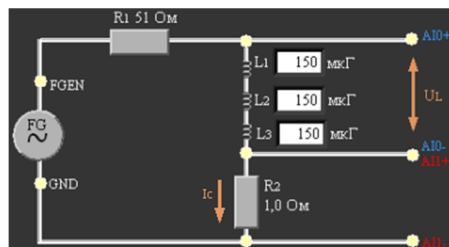
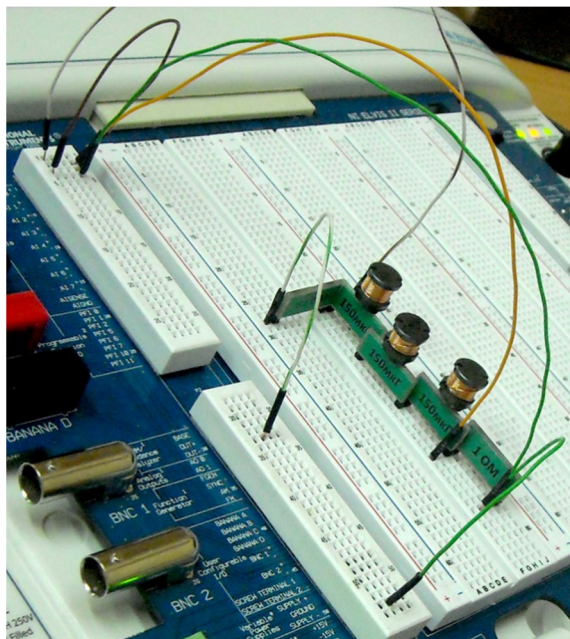
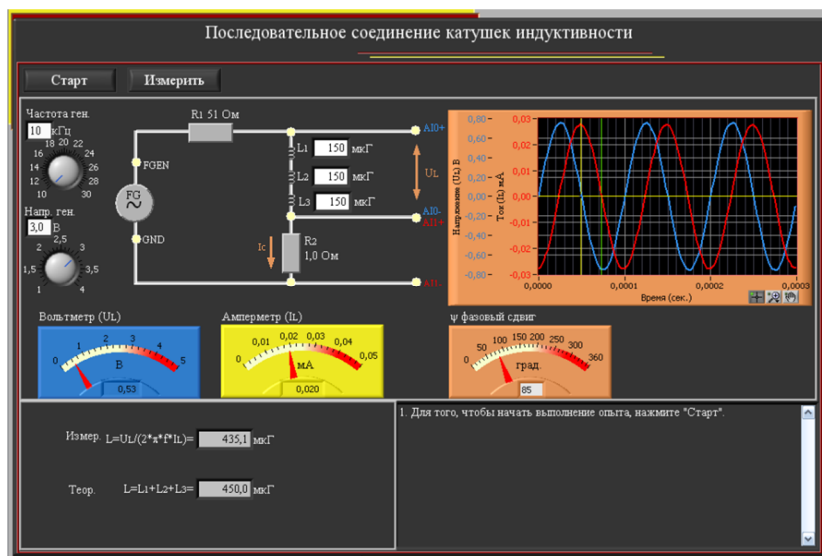


Рис. 8.2.6-2

Собрать схему на макетной плате NI ELVIS II согласно Рис. 8.2.6-2:



После проведения опыта лицевая панель примет следующий вид:



### 8.2.7. Параллельное соединение катушек индуктивности

Катушка индуктивности или дроссель являются индуктивными накопителями энергии, в которых энергия электрического тока преобразуется в энергию магнитного поля. Вокруг проводника с током образуется магнитное поле, пропорциональное количеству витков в катушке индуктивности.

При включении, выключении, или изменении тока в электрической цепи вследствие пересечения проводника собственным магнитным полем в нем индуцируется э.д.с. самоиндукции, имеющая реактивный характер. Изменение тока в катушке индуктивности не может быть мгновенным. При увеличении тока э.д.с. самоиндукции будет направлена против э.д.с. источника напряжения, и по этой причине ток в электрической цепи не может установиться сразу. Наоборот, при уменьшении тока в цепи индуцируется э.д.с. самоиндукции, препятствующая убыванию тока.

Таким образом, катушка в цепи переменного тока оказывает ему сопротивление в результате наведенной переменной электродвижущей силы самоиндукции. Это сопротивление называется реактивным, и обозначается  $X_L$ . На реактивном сопротивлении, в отличие от активного, не рассеивается тепловая энергия, а лишь запасается энергия магнитного поля.

Реактивное сопротивление индуктивности вычисляется по формуле  $X_L = 2\pi fL = \omega L$ . Как видно из формулы, величина реактивного сопротивления зависит от частоты.

Через индуктивность будет проходить переменный ток отстающий по фазе от приложенного напряжения на  $90^\circ$  (Рис. 8.2.7-1).

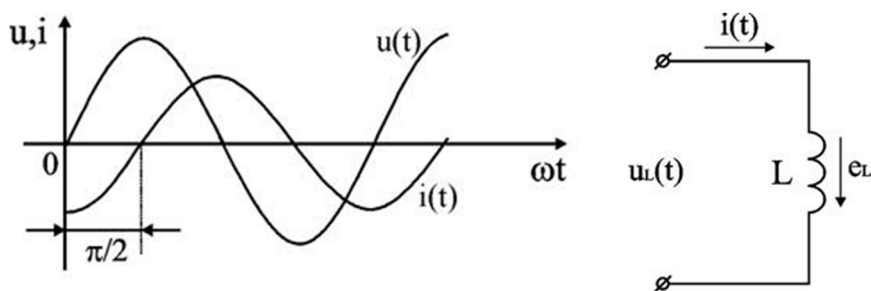


Рис. 8.2.7-1

Уравнение, выражающее связь между током и напряжением в индуктивности имеет вид:

$$u_L(t) = \omega L I_{mL} \cos(\omega t + 90^\circ) \quad (1)$$

Индуктивности могут быть подключены последовательно или параллельно.

При параллельном соединении катушек индуктивности  $L_1, L_2, L_3, \dots$  общую индуктивность цепи  $L$  можно вычислить при помощи выражения:

$$1/L = 1/L_1 + 1/L_2 + 1/L_3 + \dots \quad (2)$$

#### Рабочее задание

Для выполнения лабораторной работы необходимо выбрать в меню строку "Параллельное соединение индуктивностей", в правом нижнем углу открывшейся лицевой панели представлены подробные инструкции по выполнению.

Подключить цепь к генератору синусоидального напряжения, согласно Рис. 8.2.7-2.

Рассчитать реактивное сопротивление индуктивности. Рассчитать реактивное сопротивление батареи параллельно соединенных катушек, рассчитать величину индуктивности и проверить правильность суммарной величины.

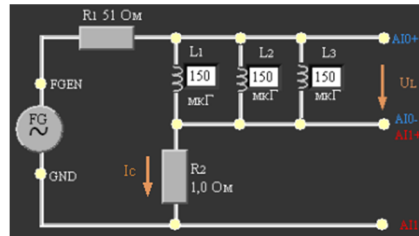
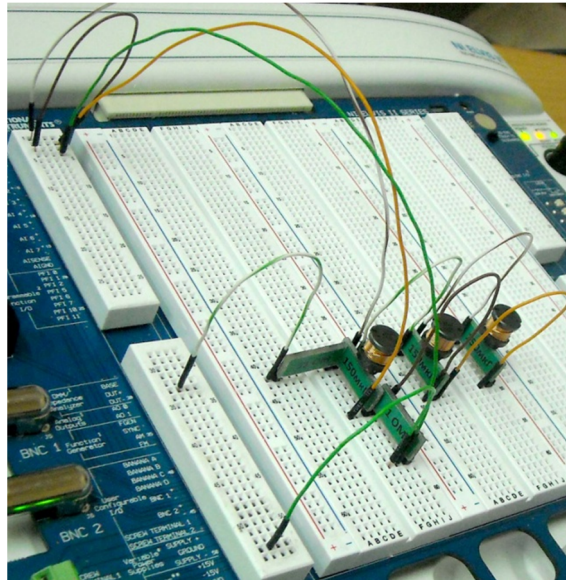


Рис. 8.2.7-2

Собрать схему на макетной плате NI ELVIS II согласно Рис. 8.2.7-2:



После проведения опыта лицевая панель примет следующий вид:



### 8.2.8. Последовательное соединение резистора и конденсатора

Когда к цепи с последовательным соединением резистора и конденсатора (Рис. 8.2.8-1) подается переменное синусоидальное напряжение, через оба компонента цепи течет одинаковый синусоидальный ток.

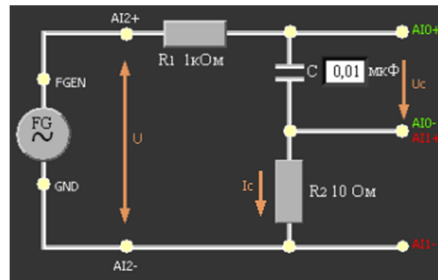


Рис. 8.2.8-1

Между напряжениями  $U_R$ ,  $U_C$  и  $U$  существуют фазовые сдвиги, обусловленные емкостным реактивным сопротивлением  $X_C$  конденсатора. Фазовый сдвиг между током  $I$  и напряжением на резисторе  $U_R$  отсутствует, тогда как сдвиг между этим током и падением напряжения на конденсаторе  $U_C$  равен  $90^\circ$  (т.е. ток опережает напряжение на  $90^\circ$ , см. "Цепи синусоидального тока с конденсатором"). При этом сдвиг между полным напряжением цепи  $U$  и током  $I$  определяется соотношением между сопротивлениями  $X_C$  и  $R$ .

Из-за фазового сдвига между током и напряжением в цепях, простое арифметическое сложение действующих или амплитудных значений напряжений на отдельных элементах цепи невозможно. Невозможно и сложение разнородных (активных и реактивных) сопротивлений.

В этом случае действующее значение полного напряжения цепи определяется как

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_C^2} = Z * I \quad (1)$$

Полное сопротивление цепи:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} = U / I \quad (2)$$

Активное сопротивление цепи:

$$R = Z * \cos \Phi \quad (3)$$

Емкостное реактивное сопротивление цепи:

$$X_C = Z * \sin \Phi \quad (4)$$

Угол сдвига фаз

$$\Phi = \arctg \frac{U_C}{U_R} = \arctg \frac{X_C}{R} \quad (5)$$

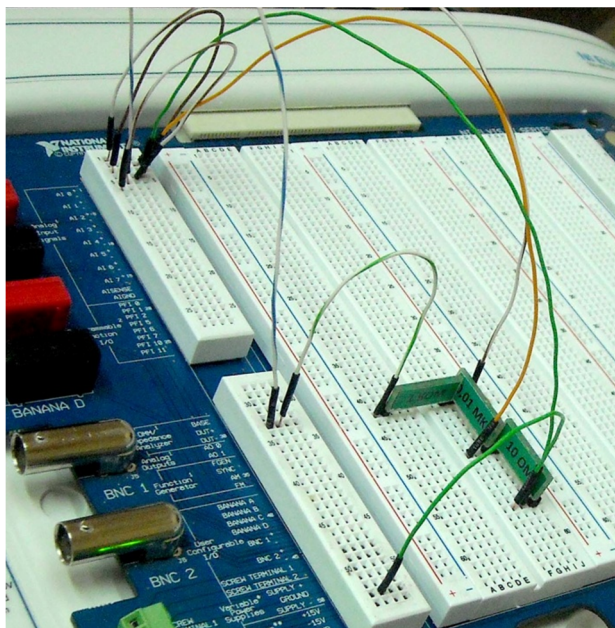
## Рабочее задание

Для выполнения лабораторной работы необходимо выбрать в меню строку “Последовательное соединение резистора и конденсатора”, в правом нижнем углу открывшейся лицевой панели представлены подробные инструкции по выполнению.

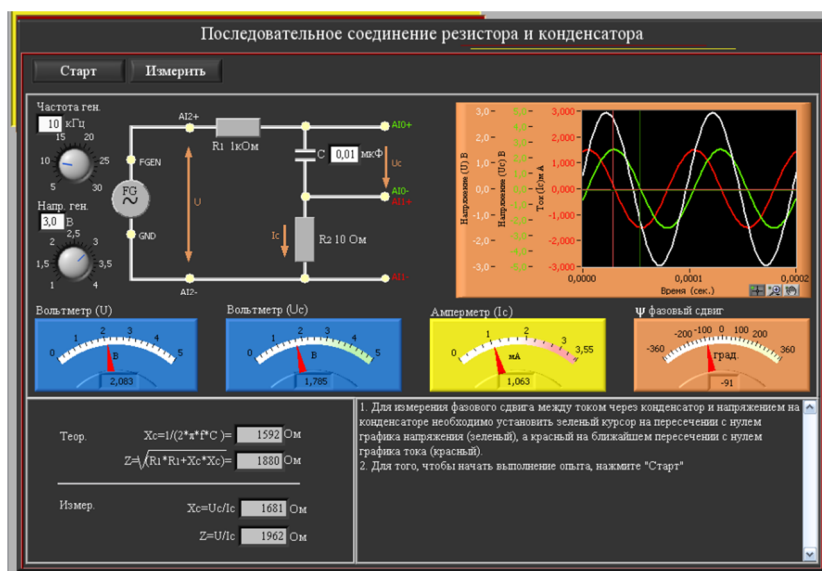
Подключить цепь к генератору синусоидального напряжения, согласно Рис. 8.2.8-1.

Для цепи с последовательным соединением резистора и конденсатора измерьте и вычислите действующие значения напряжения  $U$  на входе и конденсаторе  $U_C$ , ток  $I$ , угол сдвига фаз  $\Phi$ , полное сопротивление цепи  $Z$  и емкостное реактивное сопротивление  $X_C$ .

Собрать схему на макетной плате NI ELVIS II согласно Рис. 8.2.8-2:



После проведения опыта лицевая панель примет следующий вид:





### 8.2.9. Последовательное соединение резистора и катушки индуктивности

Когда к цепи с последовательным соединением резистора  $R$  и индуктивности  $L$  (Рис. 8.2.9-1) подается переменное синусоидальное напряжение, через оба компонента цепи течет одинаковый синусоидальный ток.

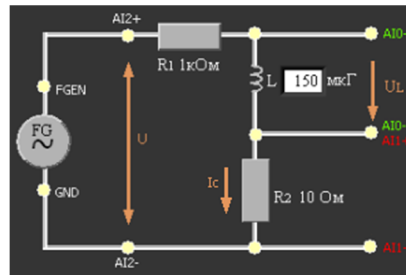


Рис. 8.2.9-1

Между напряжениями  $U_R$ ,  $U_L$  и  $U$  существуют фазовые сдвиги, обусловленные индуктивным реактивным сопротивлением  $X_L$  катушки.

Фазовый сдвиг между током  $I$  и напряжением на резисторе  $U_R$  отсутствует, тогда как сдвиг между этим током и падением напряжения  $U_L$  на катушке индуктивности равен  $90^\circ$  (ток отстает от напряжения). При этом сдвиг между полным напряжением цепи  $U$  и током  $I$  определяется соотношением между сопротивлениями  $X_L$  и  $R$ .

Из-за фазового сдвига между током и напряжением в цепях подобных данной цепи, простое арифметическое сложение напряжений на отдельных элементах невозможно, невозможно и сложение разнородных (активных и реактивных) сопротивлений.

Действующее значение полного напряжения цепи:

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_L^2} = Z * I \quad (1)$$

Полное сопротивление цепи:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = U / I \quad (2)$$

Активное сопротивление цепи:

$$R = Z * \cos \Phi \quad (3)$$

Индуктивное реактивное сопротивление цепи:

$$X_L = Z * \sin \Phi \quad (4)$$

Угол сдвига фаз

$$\Phi = \arctg \frac{X_L}{R} \quad (5)$$

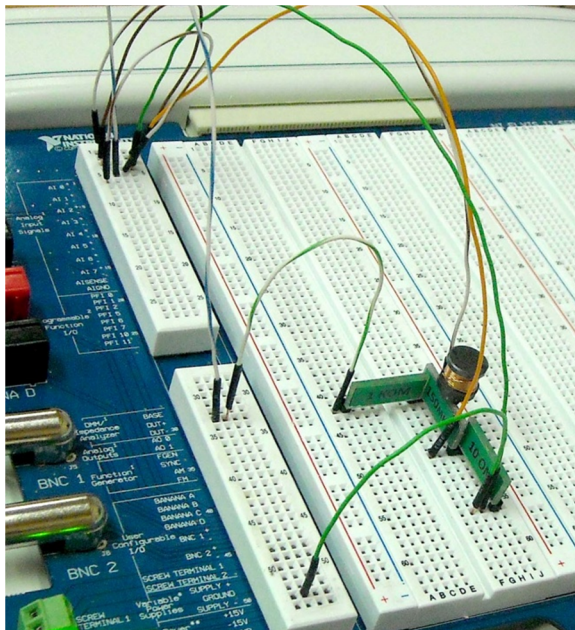
## Рабочее задание

Для выполнения лабораторной работы необходимо выбрать в меню строку “Последовательное соединение резистора и катушки индуктивности”, в правом нижнем углу открывшейся лицевой панели представлены подробные инструкции по выполнению.

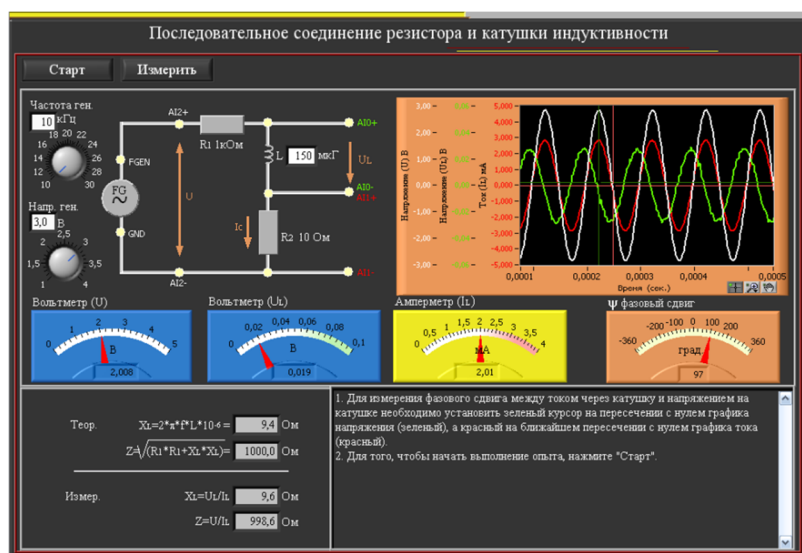
Подключить цепь к генератору синусоидального напряжения, согласно Рис. 8.2.9-1.

Для цепи с последовательным соединением резистора и индуктивности измерьте и вычислите действующие значения напряжения  $U$  на входе и на катушке  $U_L$ , ток  $I$ , угол сдвига фаз  $\Phi$ , полное сопротивление цепи  $Z$ , индуктивное реактивное сопротивление  $X_L$  и фазовый сдвиг между полным напряжением цепи  $U$  и падением напряжения на катушке  $U_L$ .

Собрать схему на макетной плате NI ELVIS II согласно Рис. 8.2.9-2:



После проведения опыта лицевая панель примет следующий вид:



### 8.2.10. Трансформатор в режиме короткого замыкания

Трансформатор представляет собой статическое электромагнитное устройство, предназначенное для преобразования посредством электромагнитной индукции системы переменного тока одного напряжения в систему переменного тока обычно другого напряжения при неизменной частоте и без существенных потерь мощности. Трансформатор может состоять из одной (автотрансформатор) или нескольких изолированных проволочных, либо ленточных обмоток, охватываемых общим магнитным потоком, намотанных, как правило, на магнитопровод

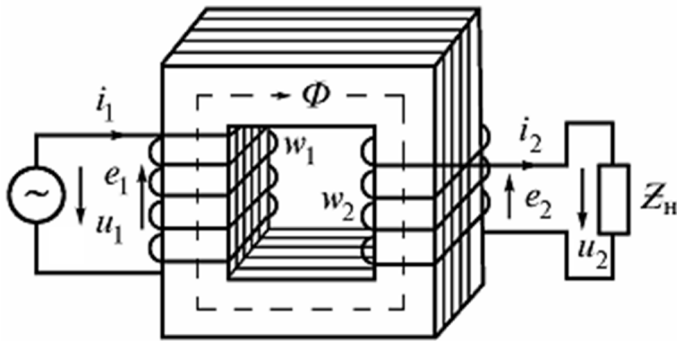


Рис. 8.2.10-1

(сердечник) из ферромагнитного материала. (Рис. 8.2.10-1). Трансформатор, не имеющий сердечника, называют воздушным или линейным.

Обмотка трансформатора, соединенная с источником питания  $U_1$ , называется первичной, а обмотка, к которой подключается потребитель электроэнергии  $Z_n$ , называется вторичной. Параметры, относящиеся к первичной обмотке, обозначаются индексом 1, например,  $w_1$ ,  $U_1$ ,

$i_1$ , а относящиеся ко вторичной обмотке, соответственно, индексом 2.

Принцип действия трансформатора основан на явлении электромагнитной индукции (взаимоиндукции). Взаимная индукция состоит в наведении ЭДС в индуктивной катушке при изменении тока в другой катушке. Под воздействием переменного тока в первичной обмотке в магнитопроводе создается переменный магнитный поток

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t, \quad (1)$$

пронизывающий первичную и вторичную обмотки и индуцирующий в них ЭДС

$$e_1 = -\frac{d\Psi_1}{dt} = -w_1 \frac{d}{dt}(\Phi_m \sin \omega t) = -\omega w_1 \Phi_m \cos \omega t = E_{1m} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right);$$

$$e_2 = -\frac{d\Psi_2}{dt} = -w_2 \frac{d}{dt}(\Phi_m \sin \omega t) = -\omega w_2 \Phi_m \cos \omega t = E_{2m} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right), \quad (2)$$

$E_{1m} = \omega w_1$  и  $E_{2m} = \omega w_2$  - амплитудные значения ЭДС.

Действующие значения ЭДС в обмотках равны

$$E_1 = \frac{\omega w_1 \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4,44 f w_1 \Phi_m; \quad E_2 = \frac{\omega w_2 \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4,44 f w_2 \Phi_m \quad (3)$$

Отношение ЭДС обмоток называется коэффициентом трансформации

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} = n \quad (4)$$

Если  $n > 1$ , то вторичная ЭДС меньше первичной, и трансформатор называется понижающим, при  $n < 1$  - трансформатор называется повышающим.

Схема замещения линейного трансформатора приведена на Рис. 8.2.10-1, а:  $R_1$  и  $R_2$  - учитывают резистивные потери энергии в обмотках;  $L_1$  и  $L_2$  -индуктивности катушек;  $M$  –коэффициент взаимной индуктивности -  $M=k(L_1L_2)^{1/2}$ , где  $k$  – коэффициент связи между катушками.  $k=1$ , когда потоки рассеяния равны нулю.

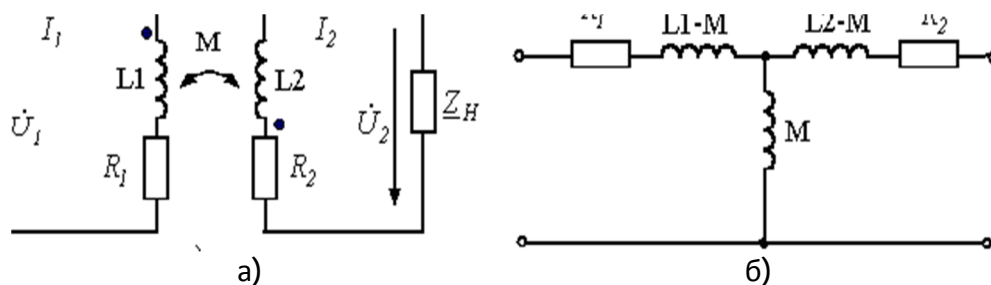


Рис. 8.2.10-1

В соответствии с законом электромагнитной индукции, ЭДС ( $e_1$  и  $e_2$ ), наводимые в каждой из связанных катушек индуктивности, создают на выводах напряжения  $u_1=-e_1$  и  $u_2=-e_2$ , которые определяются выражениями

$$u_1 = R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} \pm M \frac{di_2}{dt} \quad u_2 = R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} \pm M \frac{di_1}{dt} \quad (5)$$

Перейдя к комплексной форме записи выражений (1.5) и, получим

$$\dot{U}_1 = R_1 \dot{I}_1 + jwL_1 \dot{I}_1 - jwM \dot{I}_2, \quad \dot{U}_2 = R_2 \dot{I}_2 + jwL_2 \dot{I}_2 - jwM \dot{I}_1 \quad (6)$$

Этим уравнениям соответствует схема замещения трансформатора, приведенная на Рис. 8.2.10-1,б

При работе трансформатора в режиме холостого хода  $\dot{I}_2=0$ , ток первичной обмотки не равен нулю, а определяется выражением

$$\dot{I}_1 |_{\dot{I}_2=0} = \dot{U}_1 / (R_1 + jwL_1) = \dot{I}_{1x} \quad (7)$$

Ток  $\dot{I}_{1x}$ , потребляемый трансформатором от источника в режиме холостого хода на выходе, называется током намагничивания. Он составляет примерно 5% от номинального тока трансформатора и обращается в ноль при  $L_1=\infty$ .

В теории цепей большое значение имеет понятие "идеальный", или "совершенный" трансформатор.

Идеальным трансформатором называют трансформатор, у которого активное сопротивление обмоток, магнитные потоки рассеяния и потери мощности в магнитопроводе равны нулю. Он представляет собой две связанные катушки индуктивности с коэффициентом связи равным единице, когда вся мощность, подводимая к входу, передается на выход ( $R_1=0, R_2=0, M=(L_1L_2)^{1/2}$ ,  $p_1=u_1i_1=p_2=u_2i_2$ ). Отсюда следует

$$n = \left| -\frac{I_2}{I_1} \right| = \frac{w_1}{w_2} = \frac{U_1}{U_2} = \sqrt{L_1/L_2} \quad (8)$$

Следовательно, в идеальном трансформаторе отношение токов обмоток обратно пропорционально их напряжениям. Если к вторичной обмотке подключена нагрузка  $Z_H=U_2/I_2=R_H+jX_H$ , то входное сопротивление трансформатора определяется выражением

$$Z_n^1 = \dot{U}_1 / \dot{I}_1 = n^2 \dot{U}_2 / \dot{I}_2 = n^2 Z_n \quad (9)$$

Таким образом, входное сопротивление имеет характер сопротивления нагрузки и отличается по модулю в  $n^2$  раз.

### Схема замещения трансформатора

В реальном трансформаторе, в отличие от идеального, учитываются активные сопротивления обмоток, магнитные потоки рассеяния обмоток и потери мощности.

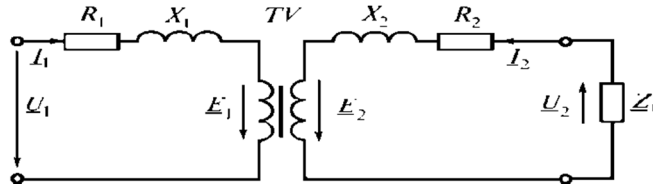


Рис. 8.2.10-2

На Рис. 8.2.10-2 приведена схема замещения трансформатора, в которой  $R_1$  и  $R_2$  активные сопротивления обмоток,  $X_1$  и  $X_2$  индуктивные сопротивления от потоков рассеяния. Они выделены отдельно, а сами обмотки показаны идеальными без этих сопротивлений. Согласно второму закону Кирхгофа уравнения для первичных и вторичных цепей в комплексной форме имеют вид

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= -\underline{E}_1 + \underline{I}_1 \underline{Z}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{I}_1 R_1 + j \underline{I}_1 X_1; \\ \underline{U}_2 &= \underline{E}_2 - \underline{I}_2 \underline{Z}_2 = \underline{E}_2 - \underline{I}_2 R_2 - j \underline{I}_2 X_2. \end{aligned} \quad (10)$$

Электрические цепи с трансформаторами сложно рассчитывать из-за магнитной связи между обмотками. Поэтому трансформатор представляют схемой замещения, в которой магнитная связь заменяется электрической цепью. С этой целью обе обмотки «приводят» к одному числу витков, обычно к числу витков первичной обмотки. Приведенные параметры вторичной цепи обозначают буквами со штрихом.

Так как считаем, что  $w_2' = w_1$ , то

$$E_2' = E_1 = n E_2, \quad I_2' = \frac{I_2}{n}, \quad R_2' = R_2 n^2; \quad X_2' = X_2 n^2 \quad (11)$$

Равенство ЭДС первичной и вторичной обмоток позволяет объединить их электрические цепи в одну цепь (Рис. 8.2.10-3).

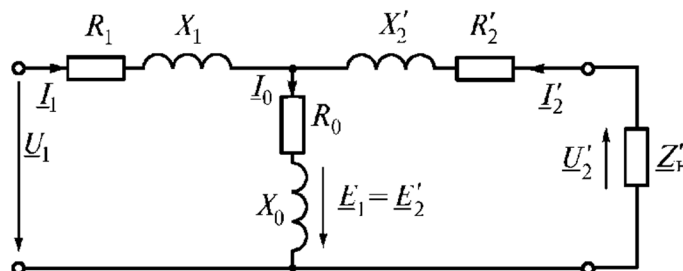


Рис. 8.2.10-3

Общий участок цепи называют ветвью намагничивания. В ней  $R_0$  – активное сопротивление, учитывающее потери мощности на перемагничивание сердечника,  $X_0$  – реактивное сопротивление, обусловленное основным магнитным потоком, а токи связаны соотношением

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_0 - \underline{I}'_2 \quad (12)$$

Если пренебречь током холостого хода  $I_0$  и удалить из схемы ветвь намагничивания, то получим упрощенную схему замещения (Рис. 8.2.10-4, а), а с учетом  $R_1 + R'_2 = R_k$  и  $X_1 + X'_2 = X_k$  – схему (Рис. 8.2.10-4, б).

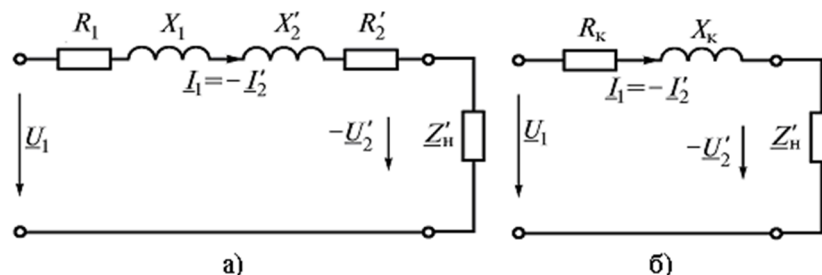


Рис. 8.2.10-4

Такую схему используют при нагрузке, близкой к номинальной.

### Опытное определение параметров схемы замещения трансформатора

Параметры схемы замещения и основные параметры трансформатора можно определить по опытам холостого хода и короткого замыкания.

При опыте холостого хода (Рис. 8.2.10-5, а) вторичная обмотка разомкнута, а к первичной обмотке подводится номинальное напряжение. В первичной цепи измеряют напряжение  $U_{1x}$ , ток  $I_{1x}$ , мощность  $P_{1x}$  – потери в магнитопроводе, и напряжение на вторичной обмотке  $U_{2x}$ . Так как ток холостого хода мал, то потерями мощности в обмотках можно пренебречь и считать показание ваттметра равным потерям в магнитной цепи.

По данным опыта определяют полное, активное и индуктивное сопротивление холостого хода и  $\cos \phi$ :

$$\begin{aligned} Z_{1x} &= |Z_1 + Z_0| = \frac{U_{1x}}{I_{1x}}; \\ R_{1x} &= R_1 + R_0 = \frac{P_{1x}}{I_{1x}^2}; \\ X_{1x} &= \sqrt{Z_{1x}^2 - R_{1x}^2}; \\ \cos \phi_0 &= \frac{P_{1x}}{(I_{1x} \cdot U_{1x})} \end{aligned} \quad (13)$$

коэффициент трансформации  $n = U_{1x}/U_{2x}$ .

При этом сопротивления холостого хода примерно равны сопротивлениям намагничивающей ветви:  $Z_{1x} \approx Z_0$ ; соединенных параллельно  $R_{1x} \approx R_0$ ;  $X_{1x} \approx X_0$ .



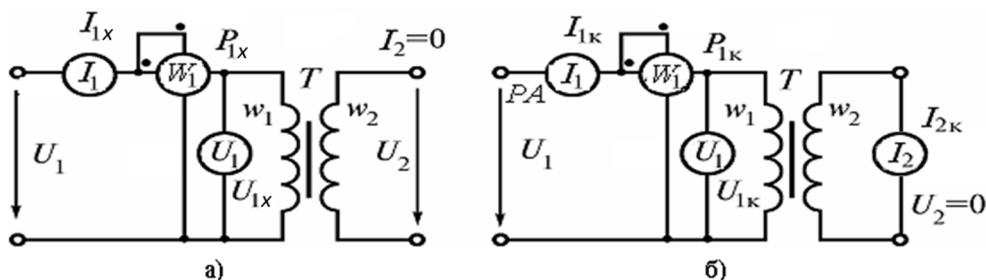


Рис. 8.2.10-5

При опыте короткого замыкания (Рис. 8.2.10-5, б) вторичная обмотка замкнута накоротко через амперметр, к первичной обмотке подводится такое напряжение, чтобы во вторичной обмотке протекал номинальный ток. В первичной цепи измеряются напряжение  $U_{1к}$ , ток  $I_{1к}$ , мощность  $P_{1к}$ . Подводимое напряжение мало, поэтому мал и магнитный поток. Значит, магнитными потерями можно пренебречь и считать показание ваттметра равным электрическим потерям в обмотках. Так как  $R_0 \gg R'_2$  и  $X_0 \gg X'_2$ , ветвь намагничивания можно не учитывать и использовать упрощенную схему замещения (Рис. 8.2.10-5, б).

По данным опыта короткого замыкания определяют параметры

$$z_k = \frac{U_{1к}}{I_{1к}}; R_k = \frac{P_{1к}}{I_{1к}^2}; X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}; \cos f_k = \frac{R_k}{Z_k} \quad (14)$$

Обычно считают, что  $R_1 \approx R'_2 = \frac{R_k}{2}$ ;  $X_1 \approx X'_2 = \frac{X_k}{2}$ .

### Внешняя характеристика трансформатора

Внешняя характеристика трансформатора представляет собой зависимость между вторичным напряжением и током нагрузки при номинальном первичном напряжении

$$\text{при } U_1 = U_{1н} = \text{const}. \quad (15)$$

Изменение вторичного напряжения определяют в процентах к номинальному напряжению  $U_{2н}$ .

$$\Delta U\% = \frac{U_{2н} - U_2}{U_{2н}} \cdot 100 = \frac{U_{1н} - U'_2}{U_{1н}} \cdot 100 \quad (16)$$

Если ввести понятие коэффициента нагрузки трансформатора  $b = I_1/I_{1н} = I_2/I_{2н}$ , то с учетом схемы замещения (Рис. 8.2.10-5, б) выражение (1.13) можно привести к виду

$$\Delta U\% = b \frac{I_{1н} R_k}{U_{1н}} \cdot 100 \cos j_2 + b \frac{I_{1н} X_k}{U_{1н}} \cdot 100 \sin j_2 \quad (17)$$

или

$$\Delta U\% = b (U_{ак} \cos j_2 + U_{рк} \sin j_2) \quad (18)$$

По известному значению  $\Delta U\%$  определяют вторичное напряжение, как

$$U_2 = U_{2H} \left( 1 - \frac{\Delta U \%}{100} \right) \quad (19)$$

Вид зависимости  $U_2 = f(I_2)$  (Рис. 8.2.10-6) определяется характером нагрузки. Так, при емкостном характере нагрузки с ростом тока  $I_2$  напряжение  $U_2$  возрастает, а при индуктивном характере падает.

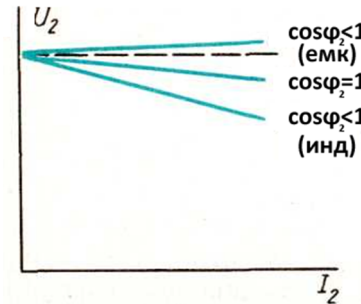


Рис. 8.2.10-6

### Мощность потерь и КПД трансформатора

Баланс мощности трансформатора выражается равенством

$$P_1 = P_2 + \Delta P = P_2 + P_M + P_3, \quad (20)$$

где  $P_1$  – активная мощность, подведенная к первичной обмотке;  $P_M$  – мощность магнитных потерь;  $P_3$  – мощность электрических потерь в обмотках,  $P_2$  – активная мощность на вторичной обмотке.

Так как  $\Phi_m = const$ , то мощность магнитных потерь не изменяется и при номинальном напряжении составляет 1...2 % от номинальной мощности. Мощность потерь в обмотках зависит от нагрузки, так как  $P_3 = I_1^2 R_K$ .

КПД трансформатора

$$h = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_M + P_3} = \frac{U_2 I_2 \cos \varphi_2}{U_2 I_2 \cos \varphi_2 + P_M + P_3}. \quad (21)$$

Так как  $b = I_1 / I_{1H} = I_2 / I_{2H}$ , при опытах холостого хода и короткого замыкания было получено

$$P_M = P_{1K}; P_3 = P_{1K} = R_K I_1^2 = b^2 R_K I_{1H}^2 = b^2 P_{KH}; \quad (22)$$

то

$$h = \frac{b S_H \cos \varphi_2}{b S_H \cos \varphi_2 + P_{10} + b^2 P_{KH}} \quad (23)$$

Посредством подбора параметров обмоток и магнитопровода для силовых трансформаторов выбирают  $\eta_{max}$  при  $\beta = 0,5-0,7$ , так как они обычно работают большее время с недогрузкой.

### Рабочее задание

Для выполнения лабораторной работы необходимо выбрать в меню строку "Трансформатор в режиме короткого замыкания", в правом нижнем углу открывшейся лицевой панели представлены подробные инструкции по выполнению.

Подключить цепь к генератору синусоидального напряжения.

Исследовать работу трансформатора в режиме короткого замыкания.

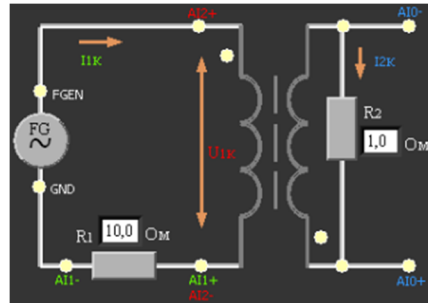


Рис. 8.2.10-7

Измеряется ток и напряжения в первичной и вторичной обмотках, а также мощность первичной обмотки (активная мощность  $P_{1к}$  первичной обмотки рассчитывается программой путем перемножения временных диаграмм тока и напряжения с последующим усреднением за период - белый цвет). Результаты измерений показывают соответствующие приборы на панели. По результатам измерений вычисляются:

$$\text{Коэффициент мощности в режиме короткого замыкания} - \cos f_{\kappa} = \frac{P_{1\kappa}}{(I_{1\kappa} \cdot U_{1\kappa})}$$

$$\text{Мощность электрических потерь в проводах} - P_{\Sigma} = P_{1\kappa} = U_{1\kappa} I_{1\kappa} \cos \varphi_{\kappa}$$

$$\text{Номинальный ток вторичной обмотки показывает амперметр} - I_{2\text{НОМ}} = I_{2\kappa}$$

Параметры схемы замещения:

$$\text{Полное сопротивление обмоток} - Z_{\kappa} = U_{1\kappa} / I_{1\kappa}$$

$$\text{Суммарное резистивное сопротивление обмоток} - R_{\kappa} = P_{1\kappa} / I_{1\kappa}^2 ;$$

$$\text{Суммарное реактивное сопротивление обмоток} - X_{\kappa} = \sqrt{Z_{\kappa}^2 - R_{\kappa}^2}$$

Собрать на макетной плате NI ELVIS II схему согласно Рис. 8.2.10-7, как показано на Рис. 8.2.10-8:

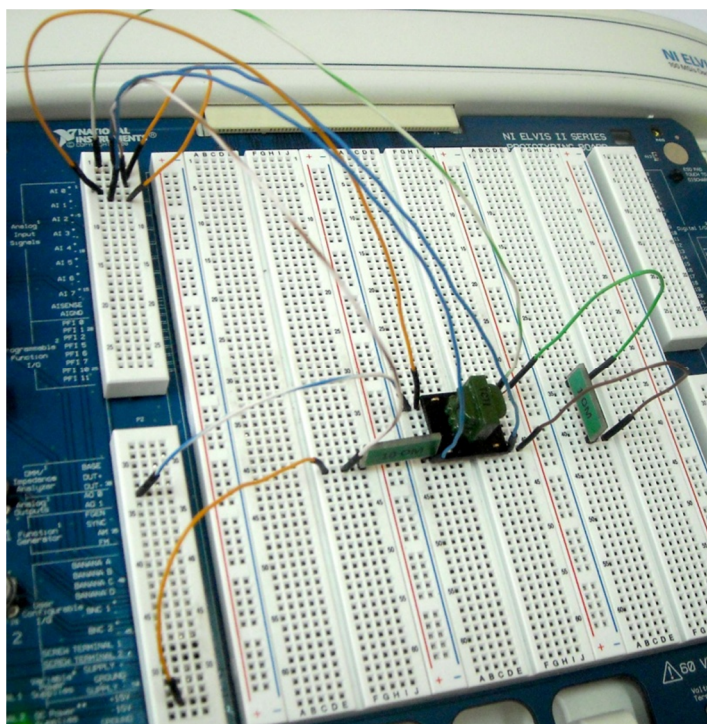


Рис. 8.2.10-8

При подключении трансформатора имейте в виду, что первичная обмотка отмечена точкой на корпусе самого трансформатора. Начала первичной и вторичной обмоток помечены точками в соответствующих углах платы (см. Рис. 8.2.10-9).



Рис. 8.2.10-9

После проведения опыта лицевая панель примет следующий вид:



### 8.2.11. Трансформаторы в режиме холостого хода

Трансформатор представляет собой статическое электромагнитное устройство, предназначенное для преобразования посредством электромагнитной индукции системы переменного тока одного напряжения в систему переменного тока обычно другого напряжения при неизменной частоте и без существенных потерь мощности. Трансформатор может состоять из одной (автотрансформатор) или нескольких изолированных проволочных, либо ленточных обмоток, охватываемых общим магнитным потоком, намотанных, как правило, на магнитопровод

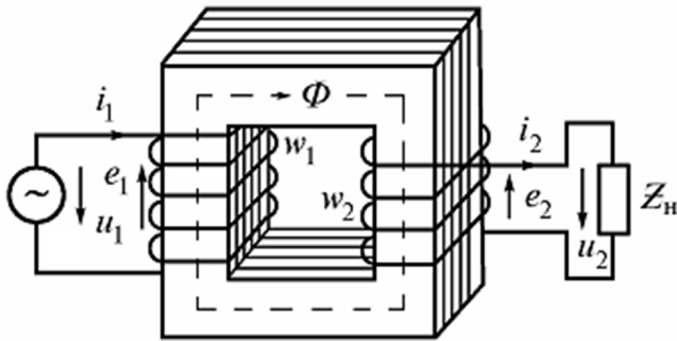


Рис. 8.2.11-1

(сердечник) из ферромагнитного материала. (Рис. 8.2.11-1). Трансформатор, не имеющий сердечника, называют воздушным или линейным.

Обмотка трансформатора, соединенная с источником питания  $u_1$ , называется первичной, а обмотка, к которой подключается потребитель электроэнергии  $Z_n$ , называется вторичной. Параметры, относящиеся к первичной обмотке, обозначаются индексом 1, например,  $w_1$ ,  $u_1$ ,

$i_1$ , а относящиеся ко вторичной обмотке, соответственно, индексом 2.

Принцип действия трансформатора основан на явлении электромагнитной индукции (взаимоиндукции). Взаимная индукция состоит в наведении ЭДС в индуктивной катушке при изменении тока в другой катушке. Под воздействием переменного тока в первичной обмотке в магнитопроводе создается переменный магнитный поток

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t, \quad (1)$$

пронизывающий первичную и вторичную обмотки и индуцирующий в них ЭДС

$$e_1 = -\frac{d\Psi_1}{dt} = -w_1 \frac{d}{dt}(\Phi_m \sin \omega t) = -\omega w_1 \Phi_m \cos \omega t = E_{1m} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right);$$

$$e_2 = -\frac{d\Psi_2}{dt} = -w_2 \frac{d}{dt}(\Phi_m \sin \omega t) = -\omega w_2 \Phi_m \cos \omega t = E_{2m} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right), \quad (2)$$

$E_{1m} = \omega w_1$  и  $E_{2m} = \omega w_2$  – амплитудные значения ЭДС.

Действующие значения ЭДС в обмотках равны

$$E_1 = \frac{\omega w_1 \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4,44 f w_1 \Phi_m; \quad E_2 = \frac{\omega w_2 \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4,44 f w_2 \Phi_m \quad (3)$$

Отношение ЭДС обмоток называется коэффициентом трансформации

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} = n \quad (4)$$

Если  $n > 1$ , то вторичная ЭДС меньше первичной, и трансформатор называется понижающим, при  $n < 1$  – трансформатор называется повышающим.

При работе трансформатора в режиме холостого хода  $i_2=0$  ток первичной обмотки не равен нулю, а определяется выражением

$$i_1|_{i_2=0} = \dot{U}_1 / (R_1 + j\omega L_1) = i_{1x} \quad (5)$$

Ток  $i_{1x}$ , потребляемый трансформатором от источника в режиме холостого хода, называется током намагничивания. Он составляет примерно 5% от номинального тока трансформатора и обращается в ноль при  $L_1=\infty$ .

В теории цепей большое значение имеет понятие "идеального", или "совершенного" трансформатора.

Идеальным трансформатором называют трансформатор, у которого активное сопротивление обмоток, магнитные потоки рассеяния и потери мощности в магнитопроводе равны нулю. Он представляет собой две связанные катушки индуктивности с коэффициентом связи равным единице, когда вся мощность, подводимая ко входу, передается на выход ( $R_1=0, R_2=0, M=(L_1L_2)^{1/2}, p_1=u_1i_1=p_2=u_2i_2$ ). Отсюда следует

$$n = \left| -\frac{I_2}{I_1} \right| = \frac{w_1}{w_2} = \frac{U_1}{U_2} = \sqrt{L_1/L_2} \quad (6)$$

Следовательно, в идеальном трансформаторе отношение токов обмоток обратно пропорционально их напряжениям.

### Схема замещения трансформатора

В реальном трансформаторе, в отличие от идеального, учитываются активные сопротивления обмоток, магнитные потоки рассеяния обмоток и потери мощности.

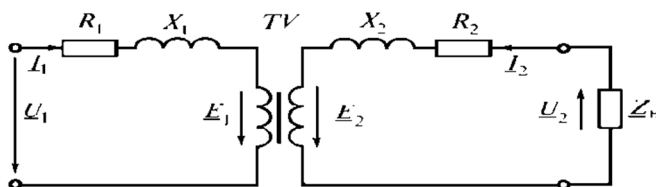


Рис. 8.2.11-2

На Рис. 8.2.11-2 приведена схема замещения трансформатора, в которой  $R_1$  и  $R_2$  активные сопротивления обмоток,  $X_1$  и  $X_2$  индуктивные сопротивления от потоков рассеяния. Они выделены отдельно, а сами обмотки показаны идеальными без этих сопротивлений. Согласно второму закону Кирхгофа уравнения для первичных и вторичных цепей в комплексной форме имеют вид

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= -\underline{E}_1 + \underline{I}_1 \underline{Z}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{I}_1 R_1 + j \underline{I}_1 X_1; \\ \underline{U}_2 &= \underline{E}_2 - \underline{I}_2 \underline{Z}_2 = \underline{E}_2 - \underline{I}_2 R_2 - j \underline{I}_2 X_2. \end{aligned} \quad (7)$$

Электрические цепи с трансформаторами сложно рассчитывать из-за магнитной связи между обмотками. Поэтому трансформатор представляют схемой замещения, в которой магнитная связь заменяется электрической цепью. С этой целью обе обмотки «приводят» к одному числу витков, обычно к числу витков первичной обмотки. Приведенные параметры вторичной цепи обозначают буквами со штрихом.

Так как считаем, что  $w'_2 = w_1$ , то



$$E'_2 = E_1 = nE_2, \quad I'_2 = \frac{I_2}{n}, \quad R'_2 = R_2 n^2; \quad X'_2 = X_2 n^2 \quad (8)$$

Равенство ЭДС первичной и вторичной обмоток позволяет объединить их электрические цепи в одну цепь (Рис. 8.2.11-3).

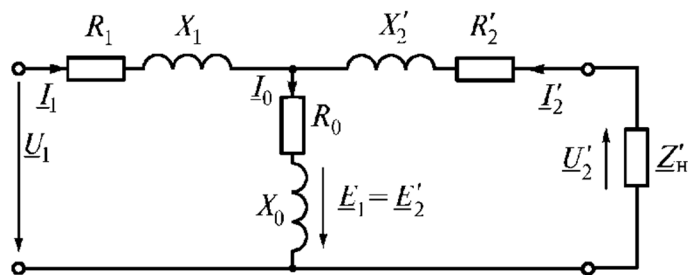


Рис. 8.2.11-3

Общий участок цепи называют ветвью намагничивания. В ней  $R_0$  – активное сопротивление, учитывающее потери мощности на перемагничивание сердечника,  $X_0$  – реактивное сопротивление, обусловленное основным магнитным потоком, а токи связаны соотношением

$$I_1 = I_0 - I'_2 \quad (9)$$

Если пренебречь током холостого хода  $I_0$  и удалить из схемы ветвь намагничивания, то получим упрощенную схему замещения (Рис. 8.2.11-4, а), а с учетом  $R_1 + R'_2 = R_k$  и  $X_1 + X'_2 = X_k$  – схему (Рис. 8.2.11-4, б).

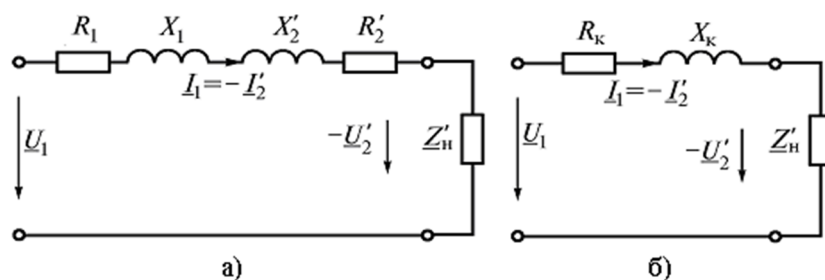


Рис. 8.2.11-4

Такую схему используют при нагрузке, близкой к номинальной.

### Опытное определение параметров схемы замещения трансформатора

Параметры схемы замещения и основные параметры трансформатора можно определить по опытам холостого хода и короткого замыкания.

При опыте холостого хода (Рис. 8.2.11-5, а) вторичная обмотка разомкнута, а к первичной обмотке подводится номинальное напряжение. В первичной цепи измеряют напряжение  $U_{1x}$ , ток  $I_{1x}$ , мощность  $P_{1x}$  – потери в магнитопроводе, и напряжение на вторичной обмотке  $U_{2x}$ . Так как ток холостого хода мал, то потерями мощности в обмотках можно пренебречь и считать показание ваттметра равным потерям в магнитной цепи.

По данным опыта определяют полное, активное и индуктивное сопротивление холостого хода и  $\cos\varphi$ :

$$Z_{1x} = |Z_1 + Z_0| = \frac{U_{1x}}{I_{1x}};$$

$$R_{1x} = R_1 + R_0 = \frac{P_{1x}}{I_{1x}^2};$$

$$X_{1x} = \sqrt{Z_{1x}^2 - R_{1x}^2};$$

$$\cos\varphi_0 = \frac{P_{1x}}{(I_{1x} \cdot U_{1x})} \quad (10)$$

коэффициент трансформации  $n = U_{1x}/U_{2x}$ .

При этом сопротивления холостого хода примерно равны сопротивлениям намагничивающей ветви:  $Z_{1x} \approx Z_0$ ; соединенных параллельно  $R_{1x} \approx R_0$ ;  $X_{1x} \approx X_0$ .

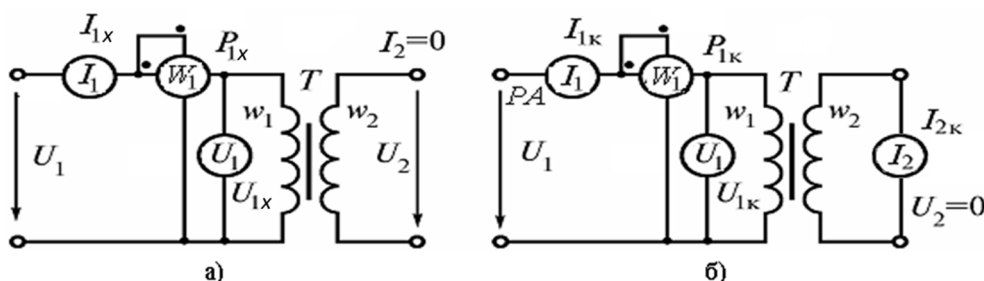


Рис. 8.2.11-5

При опыте короткого замыкания (Рис. 8.2.11-5, б) вторичная обмотка замкнута накоротко через амперметр, к первичной обмотке подводится такое напряжение, чтобы во вторичной обмотке протекал номинальный ток. В первичной цепи измеряются напряжение  $U_{1к}$ , ток  $I_{1к}$ , мощность  $P_{1к}$ . Подводимое напряжение мало, поэтому мал и магнитный поток. Значит, магнитными потерями можно пренебречь и считать показание ваттметра равным электрическим потерям в обмотках. Так как  $R_0 \gg R'_2$  и  $X_0 \gg X'_2$ , ветвь намагничивания можно не учитывать и использовать упрощенную схему замещения (Рис. 8.2.11-5, б).

По данным опыта короткого замыкания определяют параметры

$$z_k = \frac{U_{1к}}{I_{1к}}; R_k = \frac{P_{1к}}{I_{1к}^2}; X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}; \cos\varphi_k = \frac{R_k}{Z_k} \quad (11)$$

Обычно считают, что  $R_1 \approx R'_2 = \frac{R_k}{2}$ ;  $X_1 \approx X'_2 = \frac{X_k}{2}$ .

### Внешняя характеристика трансформатора

Внешняя характеристика трансформатора представляет собой зависимость между вторичным напряжением и током нагрузки при номинальном первичном напряжении

$$\text{при } U_1 = U_{1н} = \text{const}. \quad (12)$$

Изменение вторичного напряжения определяют в процентах к номинальному напряжению  $U_{2н}$ .

$$\Delta U\% = \frac{U_{2н} - U_2}{U_{2н}} \cdot 100 = \frac{U_{1н} - U'_2}{U_{1н}} \cdot 100 \quad (13)$$

Если ввести понятие коэффициента нагрузки трансформатора  $b = I_1/I_{1н} = I_2/I_{2н}$ , то с учетом схемы замещения (Рис. 8.2.11-5, б) выражение (1.13) можно привести к виду

$$\Delta U\% = b \frac{I_{1н} R_k}{U_{1н}} \cdot 100 \cos j_2 + b \frac{I_{1н} X_k}{U_{1н}} \cdot 100 \sin j_2 \quad (14)$$

или

$$\Delta U\% = b (U_{ак} \cos j_2 + U_{рк} \sin j_2) \quad (15)$$

По известному значению  $\Delta U\%$  определяют вторичное напряжение, как

$$U_2 = U_{2н} \left( 1 - \frac{\Delta U\%}{100} \right) \quad (16)$$

Вид зависимости  $U_2 = f(I_2)$  (Рис. 8.2.11-6) определяется характером нагрузки. Так, при емкостном характере нагрузки с ростом тока  $I_2$  напряжение  $U_2$  возрастает, а при индуктивном характере падает.

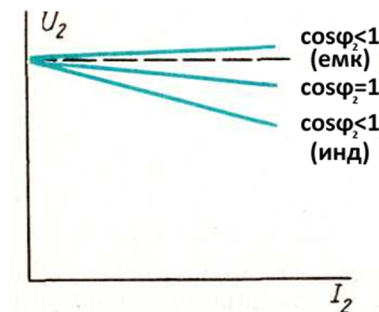


Рис. 8.2.11-6

### Мощность потерь и КПД трансформатора

Баланс мощности трансформатора выражается равенством

$$P_1 = P_2 + \Delta P = P_2 + P_m + P_{\text{э}}, \quad (17)$$

где  $P_1$  – активная мощность, подведенная к первичной обмотке;  $P_m$  – мощность магнитных потерь;  $P_{\text{э}}$  – мощность электрических потерь в обмотках,  $P_2$  – активная мощность на вторичной обмотке.

Так как  $\Phi_m = \text{const}$ , то мощность магнитных потерь не изменяется и при номинальном напряжении составляет 1...2 % от номинальной мощности. Мощность потерь в обмотках зависит от нагрузки, так как  $P_{\text{э}} = I_1^2 R_k$ .

КПД трансформатора

$$h = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_M + P_\vartheta} = \frac{U_2 I_2 \cos \varphi_2}{U_2 I_2 \cos \varphi_2 + P_M + P_\vartheta}. \quad (18)$$

Так как  $b = I_1/I_{1H} = I_2/I_{2H}$ , при опытах холостого хода и короткого замыкания было получено

$$P_M = P_{1x}; P_\vartheta = P_{1K} = R_K I_1^2 = b^2 R_K I_{1H}^2 = b^2 P_{KH}; \quad (19)$$

то

$$h = \frac{b S_H \cos \varphi_2}{b S_H \cos \varphi_2 + P_{10} + b^2 P_{KH}} \quad (20)$$

Посредством подбора параметров обмоток и магнитопровода для силовых трансформаторов выбирают  $\eta_{\max}$  при  $\beta = 0,5-0,7$ , так как они обычно работают большее время с недогрузкой.

### Рабочее задание

Для выполнения лабораторной работы необходимо выбрать в меню строку "Трансформатор в режиме холостого хода", в правом нижнем углу открывшейся лицевой панели представлены подробные инструкции по выполнению.

Подключить цепь к генератору синусоидального напряжения.

Исследовать работу трансформатора в режиме холостого хода.

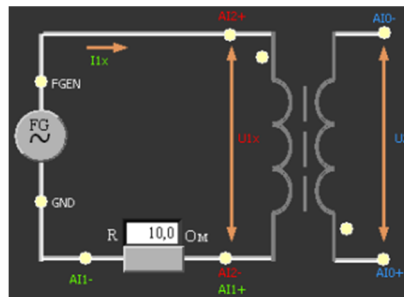


Рис. 8.2.11-7

Собрать на макетной плате NI ELVIS II схему согласно Рис. 8.2.11-7, как показано на Рис. 8.2.11-8:

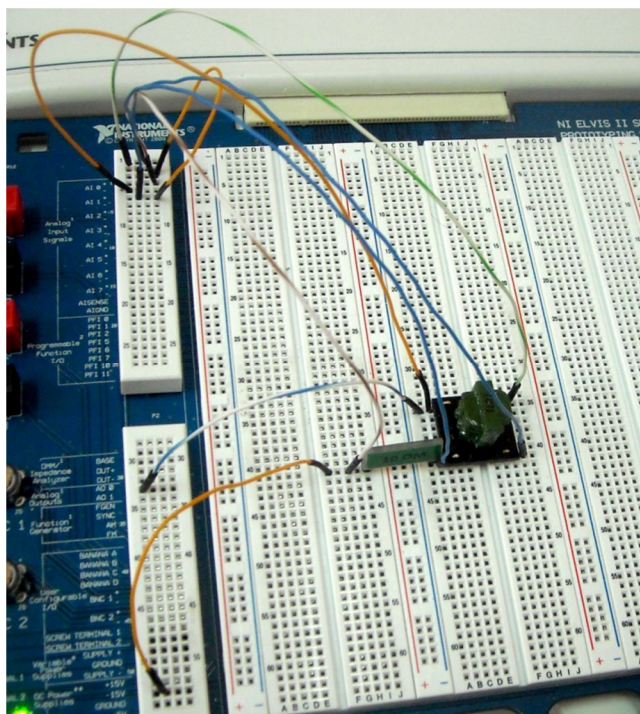


Рис. 8.2.11-8

При подключении трансформатора имейте в виду, что первичная обмотка отмечена точкой на корпусе самого трансформатора. Начала первичной и вторичной обмоток помечены точками в соответствующих углах платы (см. Рис. 8.2.11-9).



Рис. 8.2.11-9

По результатам опыта холостого хода определяются параметры намагничивающего контура - полное, активное и индуктивное сопротивление холостого хода:

$$Z_{1x} = \frac{U_{1x}}{I_{1x}}; R_{1x} = \frac{P_{1x}}{I_{1x}^2}; X_{1x} = \sqrt{Z_{1x}^2 - R_{1x}^2}.$$

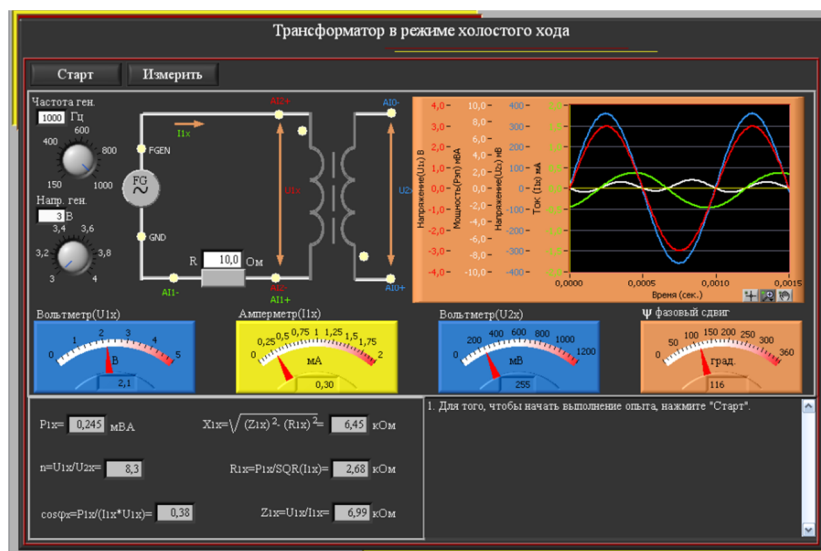
коэффициент мощности

$$\cos f_x = \frac{P_{1x}}{(I_{1x} \cdot U_{1x})}$$

коэффициент трансформации

$$n = U_{1x}/U_{2x}.$$

После проведения опыта лицевая панель примет следующий вид:



### 8.2.12. Трансформатор в режиме резистивной нагрузки

Трансформатор представляет собой статическое электромагнитное устройство, предназначенное для преобразования посредством электромагнитной индукции системы переменного тока одного напряжения в систему переменного тока обычно другого напряжения при неизменной частоте и без существенных потерь мощности. Трансформатор может состоять из одной (автотрансформатор) или нескольких изолированных проволочных, либо ленточных обмоток, охватываемых общим магнитным потоком, намотанных, как правило, на магнитопровод

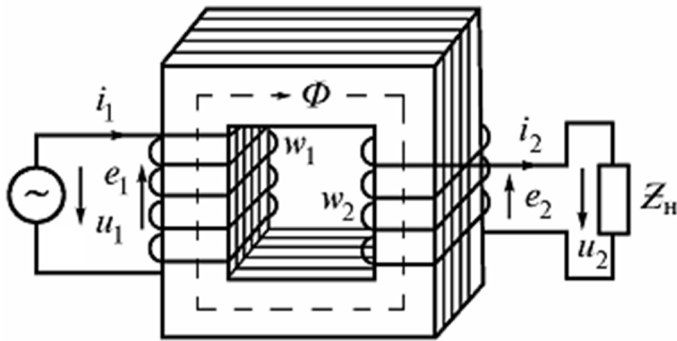


Рис. 8.2.12-1

(сердечник) из ферромагнитного материала. (Рис. 8.2.12-1). Трансформатор, не имеющий сердечника, называют воздушным или линейным.

Обмотка трансформатора, соединенная с источником питания  $U_1$ , называется первичной, а обмотка, к которой подключается потребитель электроэнергии  $Z_n$ , называется вторичной. Параметры, относящиеся к первичной обмотке, обозначаются индексом 1, например,  $w_1$ ,  $U_1$ ,

$i_1$ , а относящиеся ко вторичной обмотке, соответственно, индексом 2.

Принцип действия трансформатора основан на явлении электромагнитной индукции (взаимоиндукции). Взаимная индукция состоит в наведении ЭДС в индуктивной катушке при изменении тока в другой катушке. Под воздействием переменного тока в первичной обмотке в магнитопроводе создается переменный магнитный поток

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t, \quad (1)$$

пронизывающий первичную и вторичную обмотки и индуцирующий в них ЭДС

$$e_1 = -\frac{d\Psi_1}{dt} = -w_1 \frac{d}{dt}(\Phi_m \sin \omega t) = -\omega w_1 \Phi_m \cos \omega t = E_{1m} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right);$$

$$e_2 = -\frac{d\Psi_2}{dt} = -w_2 \frac{d}{dt}(\Phi_m \sin \omega t) = -\omega w_2 \Phi_m \cos \omega t = E_{2m} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right), \quad (2)$$

$E_{1m} = \omega w_1$  и  $E_{2m} = \omega w_2$  – амплитудные значения ЭДС.

Действующие значения ЭДС в обмотках равны

$$E_1 = \frac{\omega w_1 \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4,44 f w_1 \Phi_m; \quad E_2 = \frac{\omega w_2 \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4,44 f w_2 \Phi_m \quad (3)$$

Отношение ЭДС обмоток называется коэффициентом трансформации

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} = n \quad (4)$$

Если  $n > 1$ , то вторичная ЭДС меньше первичной, и трансформатор называется понижающим, при  $n < 1$  – трансформатор называется повышающим.



Схема замещения линейного трансформатора приведена на Рис. 8.2.12-2,а:  $R_1$  и  $R_2$  - учитывают резистивные потери энергии в обмотках;  $L_1$  и  $L_2$  -индуктивности катушек;  $M$  –коэффициент взаимной индуктивности -  $M=k(L_1L_2)^{1/2}$ , где  $k$  – коэффициент связи между катушками.  $k=1$ , когда потоки рассеяния равны нулю.

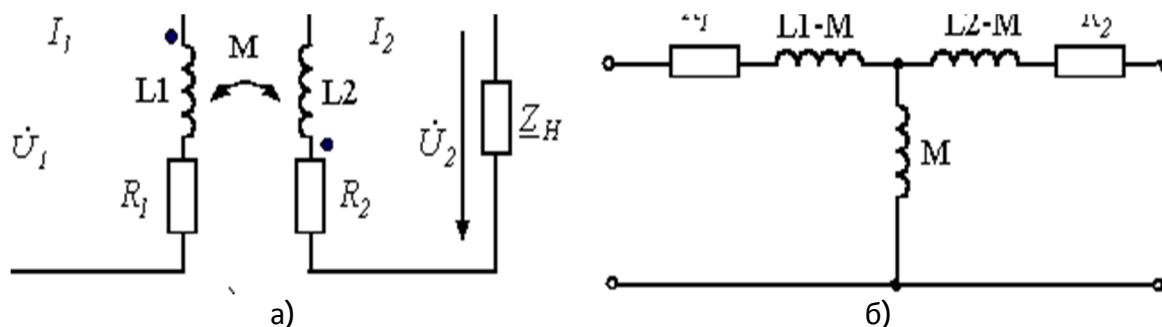


Рис. 8.2.12-2

В соответствии с законом электромагнитной индукции, ЭДС, наводимые в каждой из связанных катушек индуктивности ( $e_1$  и  $e_2$ ), создают на выводах напряжения  $u_1=-e_1$  и  $u_2=-e_2$ , которые определяются выражениями

$$u_1 = R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} \pm M \frac{di_2}{dt} \quad u_2 = R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} \pm M \frac{di_1}{dt} \quad (5)$$

Перейдя к комплексной форме записи выражений (1.5) и, получим

$$\dot{U}_1 = R_1 \dot{I}_1 + j\omega L_1 \dot{I}_1 - j\omega M \dot{I}_2, \quad \dot{U}_2 = R_2 \dot{I}_2 + j\omega L_2 \dot{I}_2 - j\omega M \dot{I}_1 \quad (6)$$

Этим уравнениям соответствует схема замещения трансформатора, приведенная на Рис. 8.2.12-2,б. При работе трансформатора в режиме холостого хода  $i_2=0$ , ток первичной обмотки не равен нулю, а определяется выражением

$$\dot{I}_1 |_{i_2=0} = \dot{U}_1 / (R_1 + j\omega L_1) = \dot{I}_{1x} \quad (7)$$

Ток  $\dot{I}_{1x}$ , потребляемый трансформатором от источника в режиме холостого хода на выходе, называется током намагничивания. Он составляет примерно 5% от номинального тока трансформатора и обращается в ноль при  $L_1=\infty$ .

В теории цепей большое значение имеет понятие "идеальный", или "совершенный" трансформатор.

Идеальным трансформатором называют трансформатор, у которого активное сопротивление обмоток, магнитные потоки рассеяния и потери мощности в магнитопроводе равны нулю. Он представляет собой две связанные катушки индуктивности с коэффициентом связи равным единице, когда вся мощность, подводимая к входу, передается на выход ( $R_1=0$ ,  $R_2=0$ ,  $M=(L_1L_2)^{1/2}$ ,  $p_1=u_1i_1=p_2=u_2i_2$ ). Отсюда следует

$$n = \left| -\frac{I_2}{I_1} \right| = \frac{w_1}{w_2} = \frac{U_1}{U_2} = \sqrt{L_1/L_2} \quad (8)$$

Следовательно, в идеальном трансформаторе отношение токов обмоток обратно пропорционально их напряжениям. Если к вторичной обмотке подключена нагрузка  $Z_H=U_2/I_2=R_H+jX_H$ , то входное сопротивление трансформатора определяется выражением

$$Z_n^1 = \dot{U}_1 / \dot{I}_1 = n^2 \dot{U}_2 / \dot{I}_2 = n^2 Z_n \quad (9)$$

Таким образом, входное сопротивление имеет характер сопротивления нагрузки и отличается по модулю в  $n^2$  раз.

### Схема замещения трансформатора

В реальном трансформаторе, в отличие от идеального, учитываются активные сопротивления обмоток, магнитные потоки рассеяния обмоток и потери мощности.

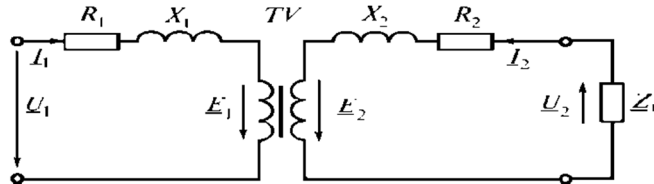


Рис. 8.2.12-3

На Рис. 8.2.12-3 приведена схема замещения трансформатора, в которой  $R_1$  и  $R_2$  активные сопротивления обмоток,  $X_1$  и  $X_2$  индуктивные сопротивления от потоков рассеяния. Они выделены отдельно, а сами обмотки показаны идеальными без этих сопротивлений. Согласно второму закону Кирхгофа уравнения для первичных и вторичных цепей в комплексной форме имеют вид

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= -\underline{E}_1 + \underline{I}_1 \underline{Z}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{I}_1 R_1 + j \underline{I}_1 X_1; \\ \underline{U}_2 &= \underline{E}_2 - \underline{I}_2 \underline{Z}_2 = \underline{E}_2 - \underline{I}_2 R_2 - j \underline{I}_2 X_2. \end{aligned} \quad (10)$$

Электрические цепи с трансформаторами сложно рассчитывать из-за магнитной связи между обмотками. Поэтому трансформатор представляют схемой замещения, в которой магнитная связь заменяется электрической цепью. С этой целью обе обмотки «приводят» к одному числу витков, обычно к числу витков первичной обмотки. Приведенные параметры вторичной цепи обозначают буквами со штрихом.

Так как считаем, что  $w_2' = w_1$ , то

$$E_2' = E_1 = n E_2, \quad I_2' = \frac{I_2}{n}, \quad R_2' = R_2 n^2; \quad X_2' = X_2 n^2 \quad (11)$$

Равенство ЭДС первичной и вторичной обмоток позволяет объединить их электрические цепи в одну цепь (Рис. 8.2.12-4).

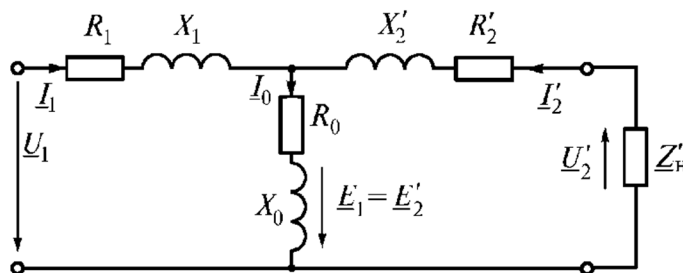


Рис. 8.2.12-4

Общий участок цепи называют ветвью намагничивания. В ней  $R_0$  – активное сопротивление, учитывающее потери мощности на перемагничивание сердечника,  $X_0$  – реактивное сопротивление, обусловленное основным магнитным потоком, а токи связаны соотношением

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_0 - \underline{I}'_2 \quad (12)$$

Если пренебречь током холостого хода  $I_0$  и удалить из схемы ветвь намагничивания, то получим упрощенную схему замещения (Рис. 8.2.12-5, а), а с учетом  $R_1 + R'_2 = R_K$  и  $X_1 + X'_2 = X_K$  – схему (Рис. 8.2.12-5, б).

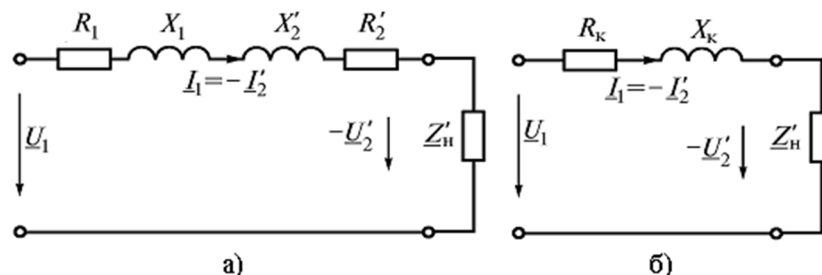


Рис. 8.2.12-5

Такую схему используют при нагрузке, близкой к номинальной.

### Опытное определение параметров схемы замещения трансформатора

Параметры схемы замещения и основные параметры трансформатора можно определить по опытам холостого хода и короткого замыкания.

При опыте холостого хода (Рис. 8.2.12-6, а) вторичная обмотка разомкнута, а к первичной обмотке подводится номинальное напряжение. В первичной цепи измеряют напряжение  $U_{1x}$ , ток  $I_{1x}$ , мощность  $P_{1x}$  – потери в магнитопроводе, и напряжение на вторичной обмотке  $U_{2x}$ . Так как ток холостого хода мал, то потерями мощности в обмотках можно пренебречь и считать показание ваттметра равным потерям в магнитной цепи.

По данным опыта определяют полное, активное и индуктивное сопротивление холостого хода и  $\cos \phi$ :

$$\begin{aligned} Z_{1x} &= |Z_1 + Z_0| = \frac{U_{1x}}{I_{1x}}; \\ R_{1x} &= R_1 + R_0 = \frac{P_{1x}}{I_{1x}^2}; \\ X_{1x} &= \sqrt{Z_{1x}^2 - R_{1x}^2}; \\ \cos \phi_0 &= \frac{P_{1x}}{(I_{1x} \cdot U_{1x})} \end{aligned} \quad (13)$$

коэффициент трансформации  $n = U_{1x}/U_{2x}$ .

При этом сопротивления холостого хода примерно равны сопротивлениям намагничивающей ветви:  $Z_{1x} \approx Z_0$ ; соединенных параллельно  $R_{1x} \approx R_0$ ;  $X_{1x} \approx X_0$ .

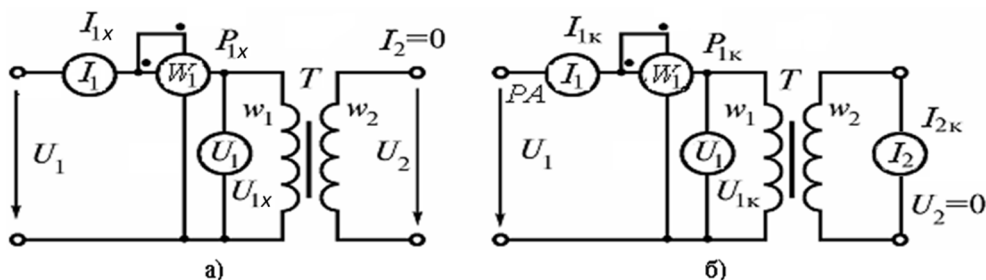


Рис. 8.2.12-6

При опыте короткого замыкания (Рис. 8.2.12-6, б) вторичная обмотка замкнута накоротко через амперметр, к первичной обмотке подводится такое напряжение, чтобы во вторичной обмотке протекал номинальный ток. В первичной цепи измеряются напряжение  $U_{1к}$ , ток  $I_{1к}$ , мощность  $P_{1к}$ . Подводимое напряжение мало, поэтому мал и магнитный поток. Значит, магнитными потерями можно пренебречь и считать показание ваттметра равным электрическим потерям в обмотках. Так как  $R_0 \gg R'_2$  и  $X_0 \gg X'_2$ , ветвь намагничивания можно не учитывать и использовать упрощенную схему замещения (Рис. 8.2.12-6, б).

По данным опыта короткого замыкания определяют параметры

$$z_k = \frac{U_{1к}}{I_{1к}}; R_k = \frac{P_{1к}}{I_{1к}^2}; X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}; \cos f_k = \frac{R_k}{Z_k} \quad (14)$$

Обычно считают, что  $R_1 \approx R'_2 = \frac{R_k}{2}$ ;  $X_1 \approx X'_2 = \frac{X_k}{2}$ .

### Внешняя характеристика трансформатора

Внешняя характеристика трансформатора представляет собой зависимость между вторичным напряжением и током нагрузки при номинальном первичном напряжении

$$\text{при } U_1 = U_{1н} = \text{const}. \quad (15)$$

Изменение вторичного напряжения определяют в процентах к номинальному напряжению  $U_{2н}$ .

$$\Delta U\% = \frac{U_{2н} - U_2}{U_{2н}} \cdot 100 = \frac{U_{1н} - U'_2}{U_{1н}} \cdot 100 \quad (16)$$

Если ввести понятие коэффициента нагрузки трансформатора  $b = I_1/I_{1н} = I_2/I_{2н}$ , то с учетом схемы замещения (Рис. 8.2.12-6, б) выражение (1.13) можно привести к виду

$$\Delta U\% = b \frac{I_{1н} R_k}{U_{1н}} \cdot 100 \cos j_2 + b \frac{I_{1н} X_k}{U_{1н}} \cdot 100 \sin j_2 \quad (17)$$

или

$$\Delta U\% = b (U_{ак} \cos j_2 + U_{рк} \sin j_2) \quad (18)$$

По известному значению  $\Delta U\%$  определяют вторичное напряжение, как

$$U_2 = U_{2H} \left( 1 - \frac{\Delta U \%}{100} \right). \quad (19)$$

Вид зависимости  $U_2 = f(I_2)$  (Рис. 8.2.12-7) определяется характером нагрузки. Так, при емкостном характере нагрузки с ростом тока  $I_2$  напряжение  $U_2$  возрастает, а при индуктивном характере падает.

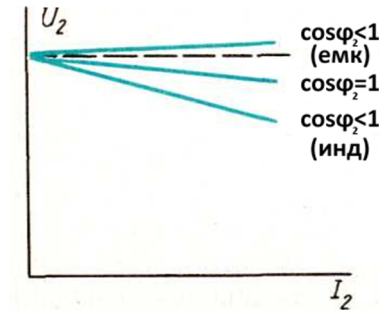


Рис. 8.2.12-7

### Мощность потерь и КПД трансформатора

Баланс мощности трансформатора выражается равенством

$$P_1 = P_2 + \Delta P = P_2 + P_M + P_9, \quad (20)$$

где  $P_1$  – активная мощность, подведенная к первичной обмотке;  $P_M$  – мощность магнитных потерь;  $P_9$  – мощность электрических потерь в обмотках,  $P_2$  – активная мощность на вторичной обмотке.

Так как  $\Phi_m = const$ , то мощность магнитных потерь не изменяется и при номинальном напряжении составляет 1...2 % от номинальной мощности. Мощность потерь в обмотках зависит от нагрузки, так как  $P_9 = I_1^2 R_K$ .

КПД трансформатора

$$h = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_M + P_9} = \frac{U_2 I_2 \cos \varphi_2}{U_2 I_2 \cos \varphi_2 + P_M + P_9}. \quad (21)$$

Так как  $b = I_1 / I_{1H} = I_2 / I_{2H}$ , при опытах холостого хода и короткого замыкания было получено

$$P_M = P_{1x}; P_9 = P_{1K} = R_K I_1^2 = b^2 R_K I_{1H}^2 = b^2 P_{KH}; \quad (22)$$

то

$$h = \frac{b S_H \cos \varphi_2}{b S_H \cos \varphi_2 + P_{10} + b^2 P_{KH}} \quad (23)$$

Посредством подбора параметров обмоток и магнитопровода для силовых трансформаторов выбирают  $\eta_{\max}$  при  $\beta = 0,5-0,7$ , так как они обычно работают большее время с недогрузкой.

## Рабочее задание

Для выполнения лабораторной работы необходимо выбрать в меню строку "Трансформатор в режиме резистивной нагрузки", в правом нижнем углу открывшейся лицевой панели представлены подробные инструкции по выполнению.

Подключить цепь к генератору синусоидального напряжения.

Исследовать работу трансформатора в режиме короткого замыкания.

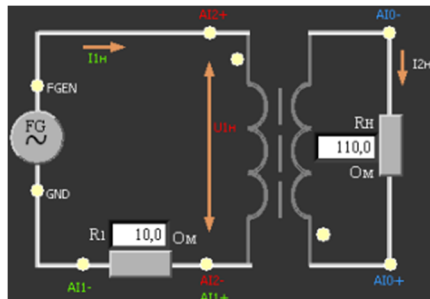


Рис. 8.2.12-8

На макетной плате NI ELVIS II собрать схему согласно Рис. 8.2.12-8, как показано на Рис. 8.2.12-9:

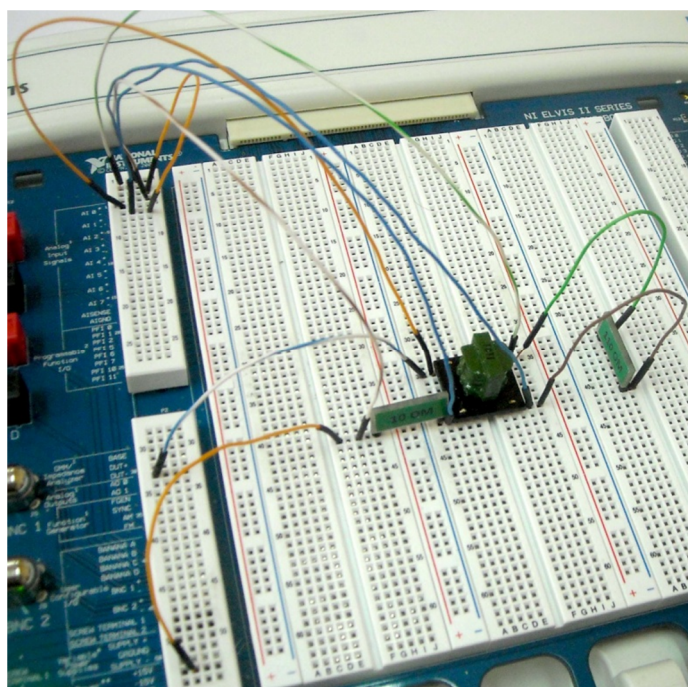


Рис. 8.2.12-9

При подключении трансформатора имейте в виду, что первичная обмотка отмечена точкой на корпусе самого трансформатора. Начала первичной и вторичной обмоток помечены точками в соответствующих углах платы (см. Рис. 8.2.12-10).



Рис. 8.2.12-10

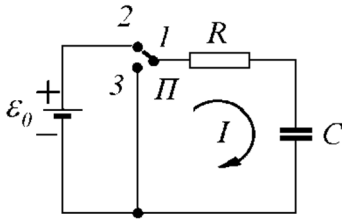
После проведения опыта лицевая панель примет следующий вид:





### 8.2.13. Переходные процессы в RC цепях

Переходные процессы возникают в электрических цепях в результате различного рода коммутаций, при переходе от одного установившегося режима к другому.



Пусть в момент времени  $t = 0$  к RC-цепи (Рис. 8.2.13-1) подключили источник с ЭДС, равной  $\varepsilon_0$  (переключатель  $\Pi$  в положении 2).

Применим закон Ома для участка цепи, считая указанное на Рис. 8.2.13-1 направление тока положительным:

Рис. 8.2.13-1 RC-цепь

$$-U_C + \varepsilon_0 = IR \quad (1)$$

где  $U_C$  — падение напряжения на конденсаторе,  $I$  — ток в цепи.

Учитывая, что  $I = \frac{dq}{dt}$  ( $q$  — заряд на верхней обкладке конденсатора), а  $U_C = \frac{q}{C}$ , и разделяя переменные, перепишем (1) в следующем виде:

$$\frac{R}{\varepsilon_0 - \frac{q}{C}} \cdot dq = dt \quad (2)$$

Проинтегрировав (2) с учетом начальных условий ( $q=0$  при  $t=0$ ), получаем

$$q(t) = \varepsilon_0 C \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right) \quad (3)$$

$$I(t) = \frac{dq}{dt} = \frac{\varepsilon_0}{R} \cdot e^{-\frac{t}{RC}} = \frac{\varepsilon_0}{R} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (4)$$

Константа  $\tau = RC$ , имеющая размерность времени и характеризующая скорость заряда конденсатора, называется постоянной времени RC-цепи, или временем релаксации.

Если в момент времени  $t = T$  переключатель  $\Pi$  перевести в положение 3 и тем самым отключить источник ЭДС, то конденсатор начнет разряжаться через сопротивление  $R$ . Полагая в (2)  $\varepsilon_0 = 0$ , находим для  $t > T$

$$q(t) = q(T) \cdot e^{-\frac{(t-T)}{RC}} \quad (5)$$

$$I(t) = \frac{dq}{dt} = \frac{\varepsilon_0}{R} \cdot \left( e^{-\frac{T}{RC}} - 1 \right) \cdot e^{-\frac{t-T}{RC}} = \left( I(T) - \frac{\varepsilon_0}{R} \right) \cdot e^{-\frac{t-T}{RC}} \quad (6)$$

где  $q(T)$  и  $I(T)$  — соответственно заряд на конденсаторе и ток в цепи в момент времени  $t = T$ .

Приведем формулы зависимостей падения напряжения на конденсаторе  $U_C(t) = \frac{q(t)}{C}$  и на резисторе  $U_R(t) = I(t) R$  от времени:

1) при  $t \leq T$

$$U_C(t) = \varepsilon_0 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (7)$$

$$U_R(t) = \varepsilon_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (8)$$

2) при  $t > T$

$$U_C(t) = U_C(T) \cdot e^{-\frac{t-T}{\tau}} \quad (9)$$

$$U_R(t) = (U_R(T) - \varepsilon_0) \cdot e^{-\frac{t-T}{\tau}} \quad (10)$$

Графики зависимостей  $\varepsilon(t)$ ,  $U_C(t)$ ,  $U_R(t)$  для рассмотренного процесса приведены на Рис. 0-2.

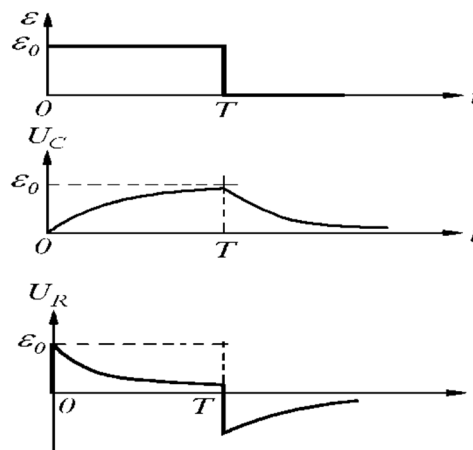


Рис. 8.2.13-2 Зависимость  $\varepsilon(t)$ ,  $U_C(t)$ ,  $U_R(t)$  для RC цепочки

### Рабочее задание

Для выполнения лабораторной работы необходимо выбрать в меню строку “Переходные процессы в простейших RC-цепях”, в правом нижнем углу открывшейся лицевой панели представлены подробные инструкции по выполнению.

Для того чтобы визуальнo наблюдать переходные процессы, происходящие в цепи при подключении ее к источнику постоянного напряжения, в качестве источника питания целесообразно использовать функциональный генератор, на выводах которого выдается напряжение, имеющее форму меандра. Таким образом, в каждом периоде происходят два переходных процесса: первый соответствует подключению цепи к источнику постоянного напряжения «+E», второй соответствует подключению цепи к источнику «-E» (E – амплитудное значение напряжения на выходе генератора импульсов).

Подключить цепь к генератору импульсов, согласно Рис. 8.2.13-3.

Получить зависимости напряжения на конденсаторе  $U_C(t)$  и тока  $I_C(t)$  при включении и выключении источника, нарисовать графики на одной оси времени (последовательные процессы включения и выключения). Написать выражение для определения постоянной времени  $\tau$ .

Снять зависимость напряжения на конденсаторе от времени  $U_C(t)$  при переходных процессах, возникающих при подключении RC-цепи к источнику напряжения формы меандра.

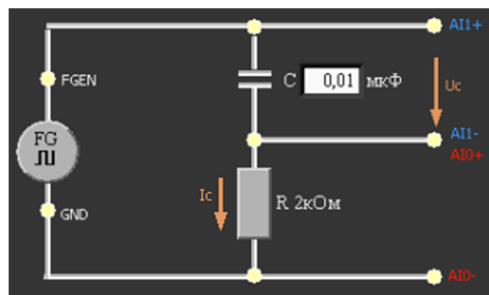
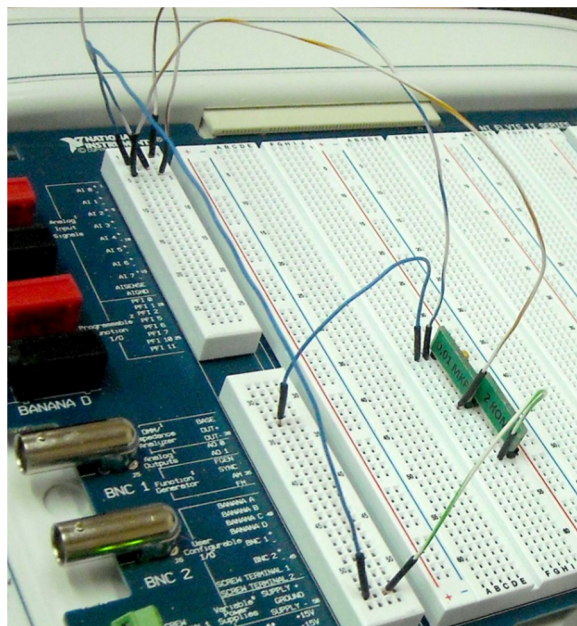
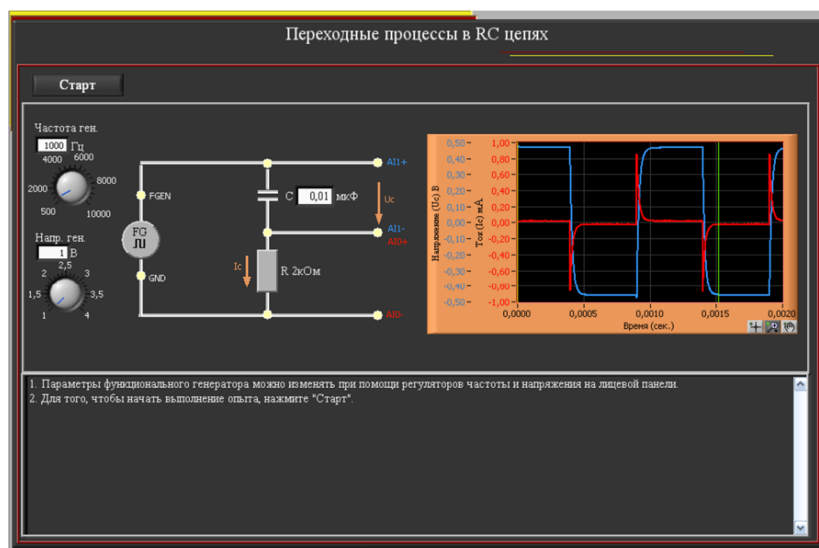


Рис. 8.2.13-3

Собрать на макетной плате NI ELVIS II схему согласно Рис. 0-4.

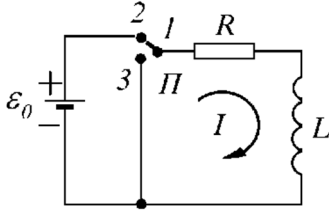


После проведения опыта лицевая панель примет следующий вид:



### 8.2.14. Переходные процессы в RL цепях

Переходные процессы возникают в электрических цепях в результате различного рода коммутаций, при переходе от одного установившегося режима к другому.



Пусть в момент времени  $t = 0$  к RL-цепи (Рис. 8.2.14-1) подключили источник с ЭДС, равной  $\varepsilon_0$  (переключатель П в положении 2).

Применим закон Ома для участка цепи, считая указанное на Рис. 8.2.14-1 направление тока положительным:

Рис. 8.2.14-1 RL-цепь

$$\varepsilon_0 - L \frac{dl}{dt} = IR \quad (1)$$

Разделяя переменные, перепишем (1) в следующем виде:

$$\frac{Ldl}{\varepsilon_0 - RI} = dt \quad (2)$$

Проинтегрировав (12) с учетом начальных условий ( $I = 0$  при  $t = 0$ ), получаем

$$I(t) = \frac{\varepsilon_0}{R} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{tR}{L}} \right) \quad (3)$$

Если в момент времени  $t = T$  переключатель П перевести в положение 3 и тем самым отключить источник ЭДС от цепи, то, полагая в (12)  $\varepsilon_0 = 0$ , получим для  $t > T$

$$I(t) = I(T) \cdot \left( 1 - e^{-\frac{(t-T)R}{L}} \right) \quad (4)$$

Константа  $t = \frac{L}{R}$ , имеющая размерность времени и характеризующая скорость изменения тока в цепи, называется постоянной времени RL-цепи.

Приведем формулы зависимостей падения напряжения на резисторе  $U_R(t) = I(t) \cdot R$  и на катушке индуктивности  $U_L(t) = L \cdot \frac{dI(t)}{dt}$  от времени:

1) при  $t \leq T$

$$U_R(t) = \varepsilon_0 \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (5)$$

$$U_L(t) = \varepsilon_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (6)$$

2) при  $t > T$

$$U_R(t) = U_R(T) \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t-T}{\tau}} \right) \quad (7)$$

$$U_L(t) = (U_L(T) - e_0) \cdot e^{-\frac{t-T}{\tau}} \quad (8)$$

Графики зависимостей  $e(t)$ ,  $U_L(t)$ , а также падения напряжения на сопротивлении  $U_R(t) = IR$  приведены на Рис. 8.2.14-2.

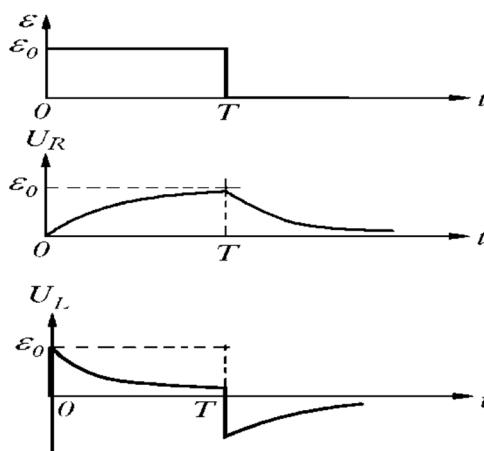


Рис. 8.2.14-2 Зависимость  $e(t)$ ,  $U_C(t)$ ,  $U_R(t)$  для RL цепочки

#### Рабочее задание

Для выполнения лабораторной работы необходимо выбрать в меню строку “Переходные процессы в простейших RL-цепях”, в правом нижнем углу открывшейся лицевой панели представлены подробные инструкции по выполнению.

Для того чтобы визуальнo наблюдать переходные процессы, происходящие в цепи при подключении ее к источнику постоянного напряжения, в качестве источника питания целесообразно использовать функциональный генератор, на выводах которого выдается напряжение, имеющее форму меандра. Таким образом, в каждом периоде происходят два переходных процесса: первый соответствует подключению цепи к источнику постоянного напряжения «+Е», второй соответствует подключению цепи к источнику «-Е». (Е – амплитудное значение напряжения на выходе генератора импульсов).

Подключить цепь к генератору импульсов, согласно Рис. 8.2.14-3.

Получить зависимости напряжения и тока катушки  $U_L(t)$  и  $I_L(t)$  при включении и выключении источника. При решении этой задачи внутреннее сопротивление источника не учитывать. Нарисовать их графики на одной оси времени (последовательные процессы включения и выключения). Написать выражение для определения постоянной времени  $\tau$ .

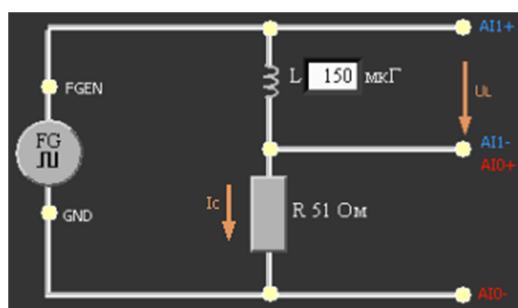
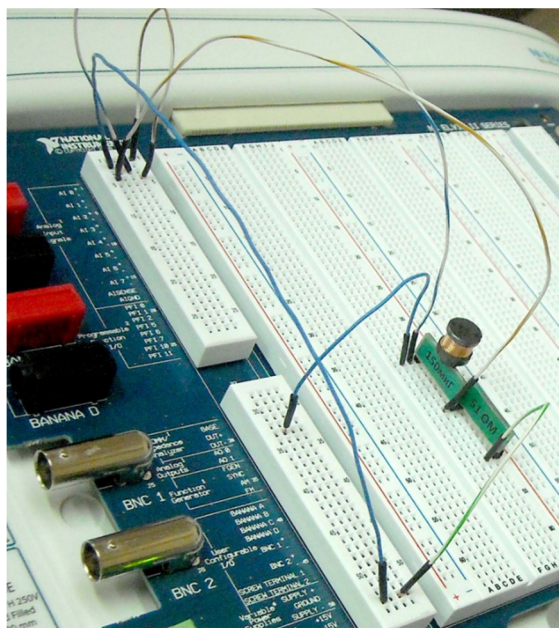
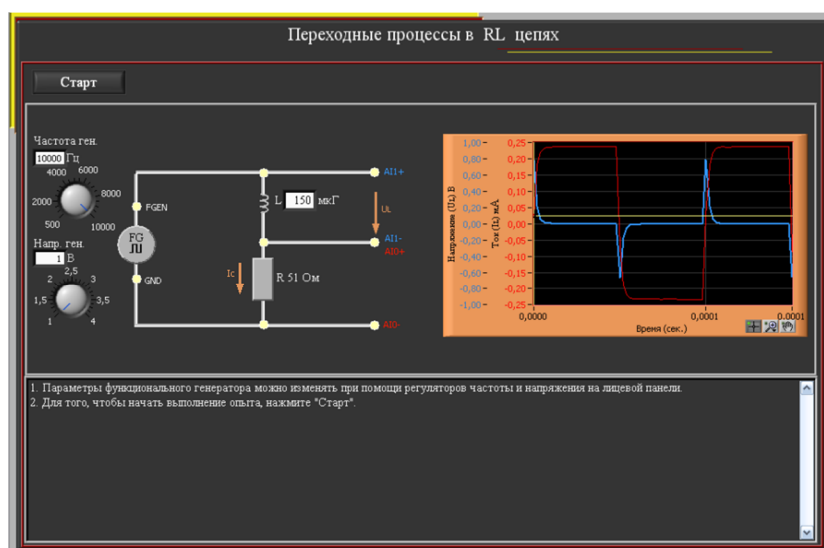


Рис. 8.2.14-3

Собрать на макетной плате NI ELVIS II схему согласно Рис. 8.2.14-3:

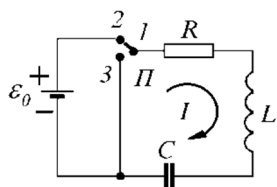


После проведения опыта лицевая панель примет следующий вид:



### 8.2.15. Переходные процессы в RLC цепях

Переходные процессы возникают в электрических цепях в результате различного рода коммутаций, при переходе от одного установившегося режима к другому.



Если в момент времени  $t=0$  к RLC-цепи (Рис. 8.2.15-1) подключить источник ЭДС, равной  $\varepsilon_0$  (переключатель  $\Pi$  в положении 2), то в цепи возникнут затухающие колебания.

Рис. 8.2.15-1 RLC-цепь

Применяя закон Ома для цепи, получим следующее уравнение:

$$L \frac{dl}{dt} + IR + \frac{q}{C} = e_0 \quad (1)$$

Решая это уравнение, получим зависимость падения напряжения на конденсаторе от времени

$$U_C(t) = \frac{q(t)}{C} = e_0(1 - e^{-gt} \cdot \cos \omega t) \quad (2)$$

где

$$g = \frac{R}{2L} \quad - \text{коэффициент затухания в контуре,}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2} = \sqrt{\omega_0^2 - \gamma^2} \quad - \text{частота собственных затухающих колебаний в RLC-контуре,}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad - \text{частота собственных незатухающих колебаний в контуре при } R = 0.$$

Графики зависимостей  $\varepsilon(t)$ ,  $U_C(t)$  приведены на Рис. 8.2.15-2.

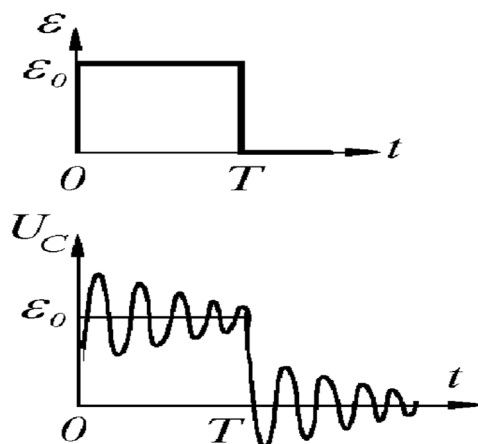


Рис. 8.2.15-2 Зависимость  $\varepsilon(t)$ ,  $U_C(t)$ ,  $U_R(t)$  для RLC цепочки



Степень затухания в контуре принято характеризовать величиной, называемой логарифмическим декрементом затухания  $\theta$ :

$$\theta = \gamma T = 1n \frac{U_k}{U_{k+1}} \quad (3)$$

где  $U_k$ ,  $U_{k+1}$  - значения напряжения на конденсаторе, соответствующие двум соседним максимумам колебаний.

Важной характеристикой контура является добротность  $Q$ , характеризующая степень убывания энергии в контуре с течением времени. Добротность связана с логарифмическим декрементом соотношением:

$$Q = \frac{\pi}{\theta}. \quad (4)$$

При малых значениях активного сопротивления  $R$ , когда  $\gamma \ll \omega_0$ , для добротности и частоты собственных колебаний можно записать:

$$Q \approx \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \approx 2\pi \cdot \frac{W}{\delta W} \gg 1, \quad \omega \approx \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (5)$$

где

$W$  - энергия, запасенная в контуре, а

$\delta W$  - уменьшение этой энергии за период колебания  $T = \frac{2\pi}{\omega}$

Отметим, что при  $g > \omega_0$  (затухание велико) зависимость  $U_c(t)$  будет иметь аperiодический характер. Активное сопротивление контура, при котором  $g = \omega_0$ , называют критическим:

$$R_d = 2\sqrt{\frac{L}{C}} \quad (6)$$

При переключении ключа П из положения 2 в положение 3 амплитуда колебаний силы тока в цепи вновь возрастает, при этом законы изменения напряжения в контуре аналогичны описанным выше.

### Рабочее задание

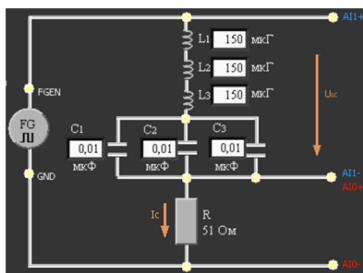
Для выполнения лабораторной работы необходимо выбрать в меню строку "Переходные процессы в RLC цепях", в правом нижнем углу открывшейся лицевой панели представлены подробные инструкции по выполнению.

Для того чтобы визуальнo наблюдать переходные процессы, происходящие в цепи при подключении ее к источнику постоянного напряжения, в качестве источника питания целесообразно использовать функциональный генератор, на выводах которого выдается напряжение, имеющее форму меандра. Таким образом, в каждом периоде происходят два переходных процесса: первый соответствует подключению цепи к источнику постоянного напряжения «+Е», второй соответствует подключению цепи к источнику «-Е». (Е – амплитудное значение напряжения на выходе генератора импульсов).

Подключить цепь к генератору импульсов, согласно Рис. 8.2.15-3.

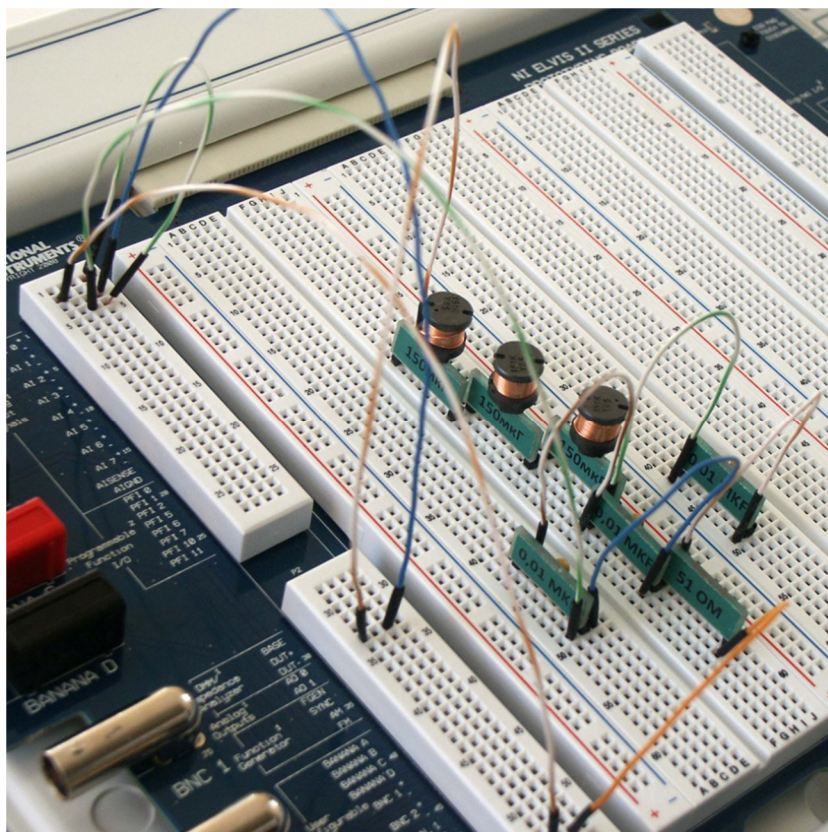
Считая известными величины  $r$ ,  $L$ ,  $C$  и напряжение на генераторе  $U_g$ , а сопротивление катушки индуктивности  $r_k = 0$ , получить выражение для напряжения  $U_L(t)$  при колебательных процессах

зарядки и разрядки конденсатора. Выражение получить, рассчитывая  $U_L(t)$  классическим методом.



**Рис. 8.2.15-3**

Собрать на макетной плате NI ELVIS II схему согласно Рис. 8.2.15-3:



После проведения опыта лицевая панель примет следующий вид:

