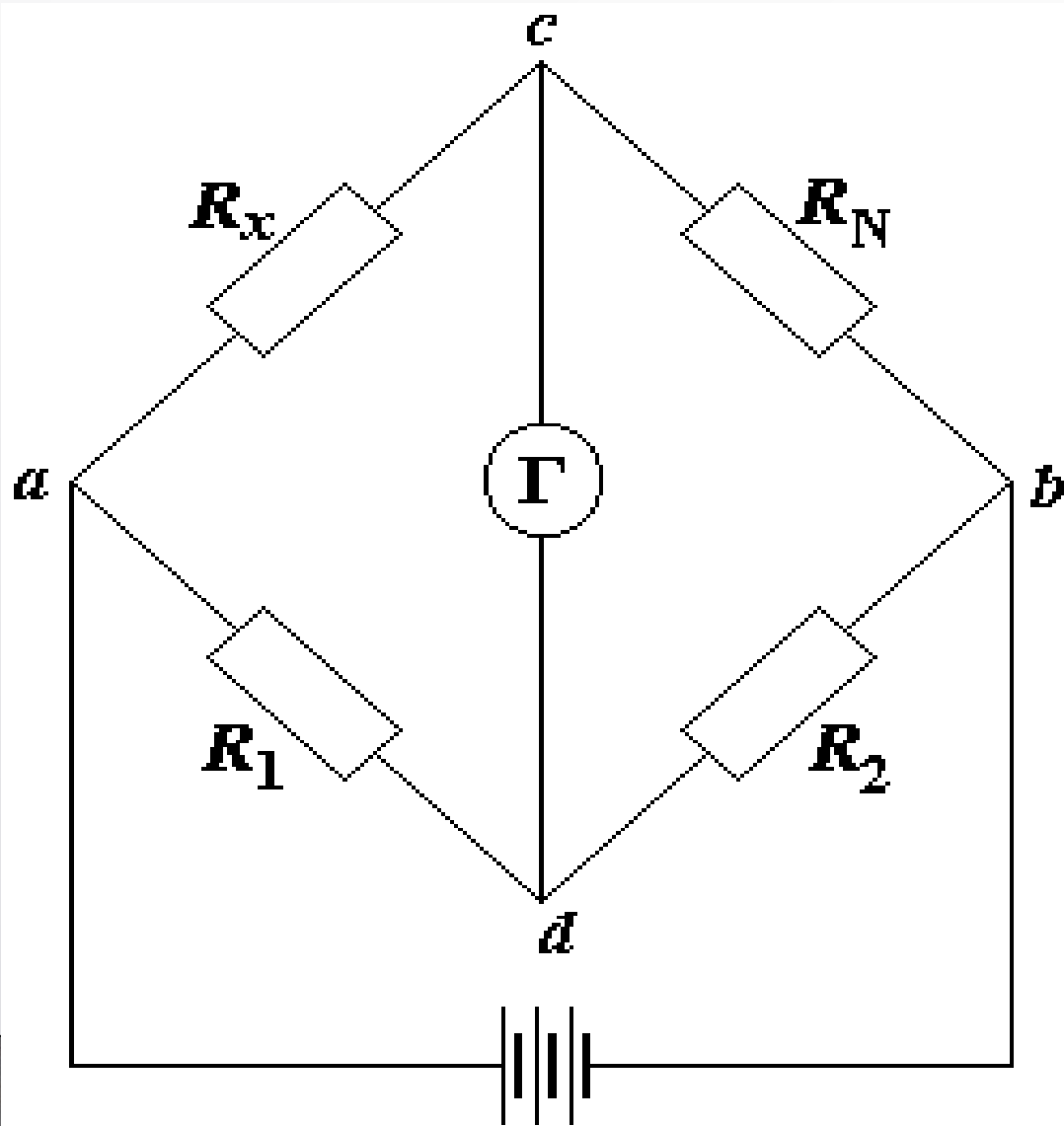


Измерение индуктивности и
емкости конденсаторов с
помощью измерительного моста
переменного тока, методом
амперметра, вольтметра и
ваттметра

Мосты постоянного тока (мост Уинстона)



ac, cb, bd, da – плечи моста,

ab – диагональ питания,

cd – измерительная диагональ.

Условие равновесия

$$I_{\Gamma} = 0$$

выполняется при:

$$R_x R_2 = R_N R_1$$

Рабочая формула моста:

$$R_x = R_N R_1 / R_2$$

Погрешность измерений сопротивления с помощью одинарного моста

Относительная погрешность измерения сопротивления $\delta = \Delta R_x / R_x$ складывается из трёх составляющих:

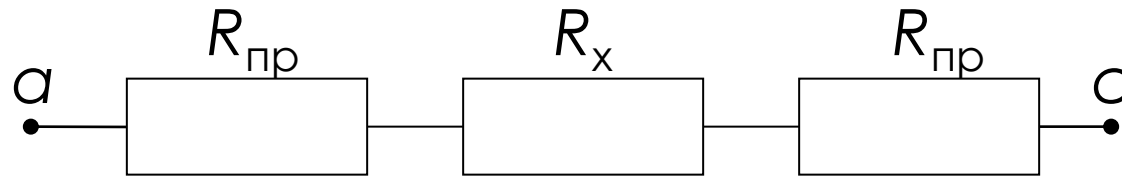
$$\delta = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3$$

Из-за влияния сопротивлений соединительных проводов и переходных контактов

Из-за неточности уравнивания моста

Погрешность сопротивлений резисторов, включённых в плечи моста

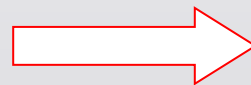
Оценка погрешностей измерения с помощью одинарного моста



$$\delta_1 = 2 R_{пр} / R_x \approx 0,01 / R_x$$

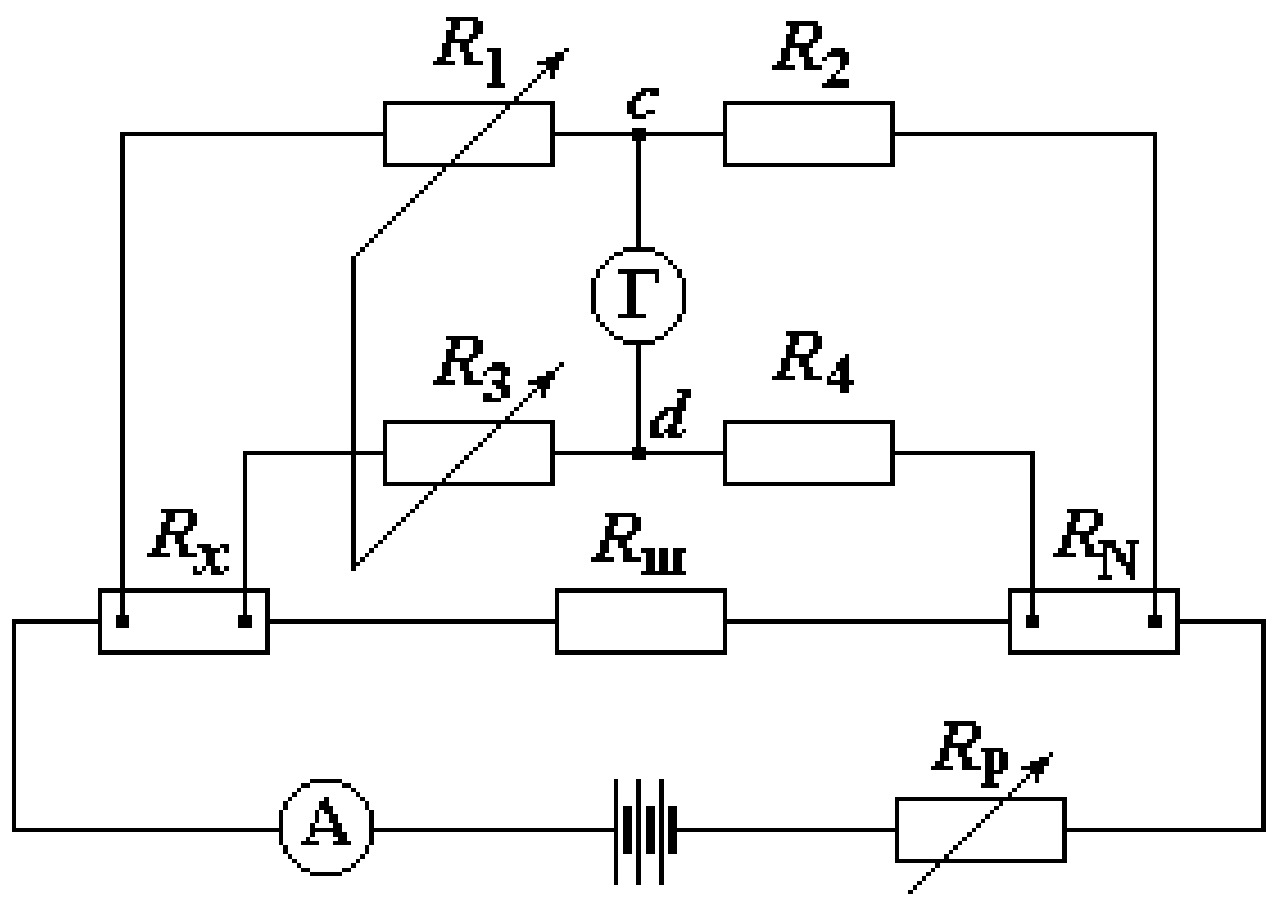
Следовательно, при помощи одинарного моста с относительной погрешностью не больше 1 % можно измерять лишь сопротивления R_x больше 1 Ом.

$$R_x = R_N R_1 / R_2$$



$$\delta_2 = \delta R_1 + \delta R_2 + \delta R_N$$

Двойной мост Томсона



Реализована четырёхконтактная схема включения в электрическую цепь измеряемого сопротивления R_x и образцового сопротивления R_N .

Цель – исключить (в максимальной степени уменьшить) влияние на результат соединительных проводов и контактных сопротивлений.

Рабочая формула двойного моста постоянного тока

$$R_x = R_N (R_1/R_2) + R_4 R_{III} (R_1/R_2 - R_3/R_4) / (R_3 + R_4 + R_{III})$$

Сопротивление шины

R_{III} – неизвестно.

Можно пренебречь при:

$$R_1/R_2 = R_3/R_4$$

На практике это условие реализуют, выбирая одинаковыми соответствующие пары сопротивлений ($R_1 = R_3, R_2 = R_4$) с общей регулировкой.

Рабочая формула моста:

$$R_x = R_N (R_1/R_2)$$

Достоинства и недостатки мостовых методов

Измерения с мостовой схемой относятся к одним из наиболее точных методов измерения сопротивления с относительной погрешностью, достигающей 10^{-5} . Это объясняется тем, что в мостовой схеме происходит **непосредственное** высокоточное сравнение измеряемого сопротивления с эталонными резисторами высокой точности и стабильности.

К недостаткам метода можно отнести трудоемкость и медленность измерений, что, однако, преодолено в современных автоматических мостах, где подбор баланса происходит автоматически под управлением микропроцессора.

В состав цепей переменного тока входят резистивные элементы, катушки индуктивности, конденсаторы и элементы, соединенные магнитной или емкостной связью с другими цепями.

В резистивных элементах электрическая энергия преобразуется в другие виды энергии.

Резистивный элемент характеризуется значением сопротивления и обладает некоторой индуктивностью и емкостью, влиянием которых в ряде случаев можно пренебречь (например, при низкой частоте).

Индуктивный элемент кроме индуктивности обладает также сопротивлением, которым, как правило, пренебречь нельзя. Иногда учитывается и влияние емкости.

В емкостном элементе имеются некоторые потери энергии, но они относительно невелики, и поэтому их можно не учитывать.

Процессы в цепях переменного тока отличаются от процессов в цепях постоянного тока, токи и напряжения которых неизменны. При неизменных токах в цепи не изменяются электрические и магнитные поля, связанные с цепью.

Активное сопротивление

Резистор обладает **активным сопротивлением**.
Еще иногда его называют **омическим**.

- 1) *Сила тока через активное (омическое) сопротивление имеет такую же форму, как и форма напряжения.*
- 2) *Сила тока и напряжение на активном сопротивлении совпадают по фазе, то есть куда напряжение, туда и ток. Они двигаются **синфазно**, то есть одновременно.*
- 3) *С ростом частоты ничего не меняется (если только на очень высоких частотах).*

Конденсатор в цепи переменного тока

С увеличением частоты растет сила тока, в отличие от резистора. То есть получается в данном случае из закона Ома, что сопротивление конденсатора зависит от частот, называется оно не просто сопротивлением, а **реактивным сопротивлением** и вычисляется по формуле:

$$X_c = \frac{1}{2\pi F C}$$

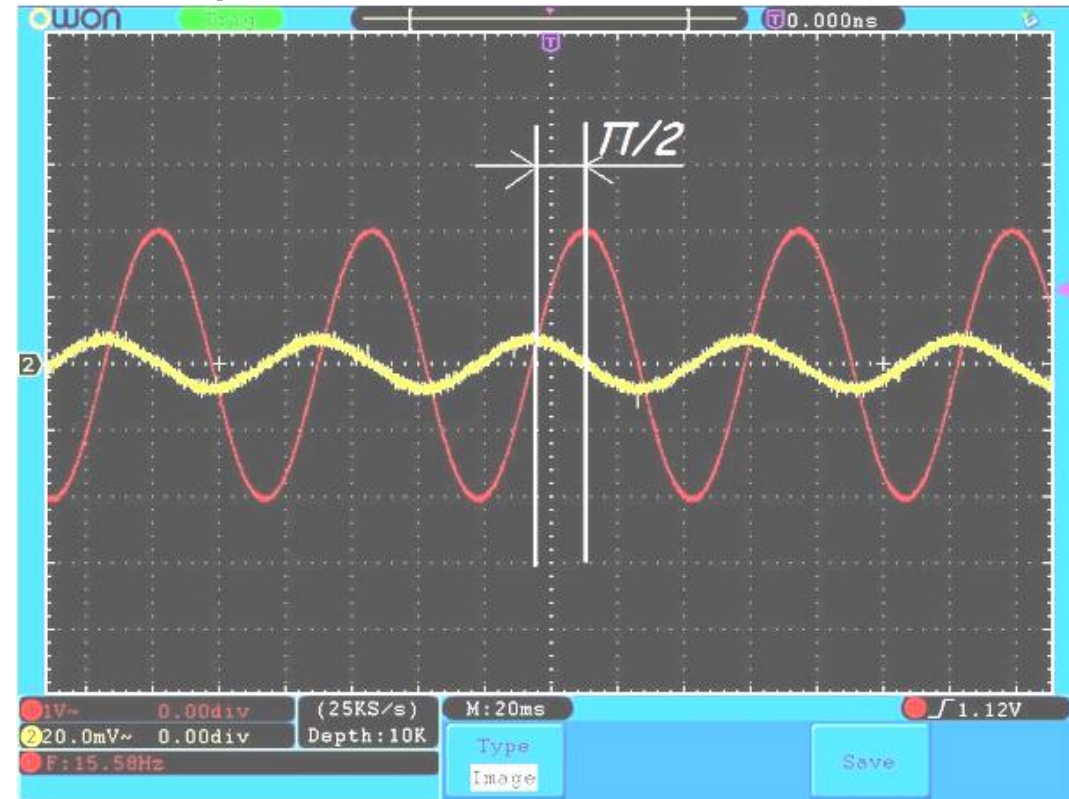
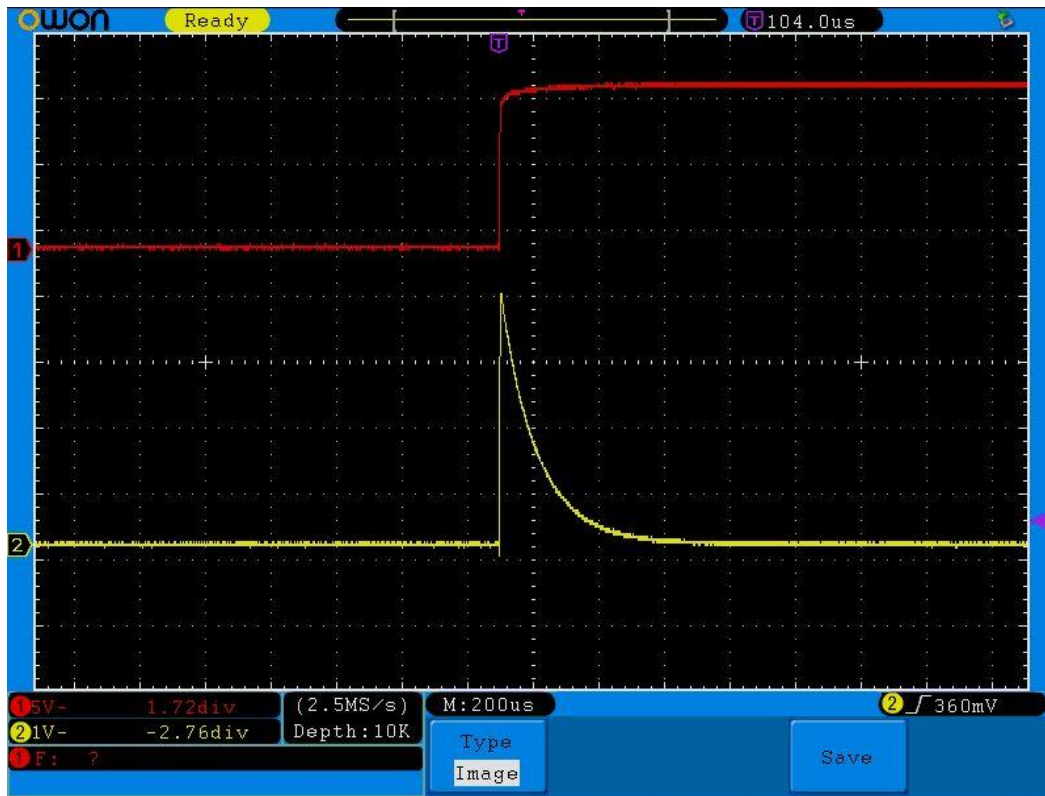
X_c — реактивное
сопротивление конденсатора,
Ом

π — постоянная и
приблизительно равна 3,14

F — частота, Гц

C — емкость конденсатора,
Фарад

В самые первые доли секунд, конденсатор ведет себя как проводник с очень малым сопротивлением, поэтому сила тока в этот момент будет максимальна. В этом можно легко убедиться, если резко подать на конденсатор напряжение и в начальный момент времени посмотреть, что происходит с силой тока



Красная осциллограмма — это напряжение, которое мы подаем на конденсатор, а желтая — это сила тока в цепи конденсатора. По мере заряда конденсатора сила тока падает и достигает нуля при полном заряде конденсатора.

Катушка индуктивности в цепи переменного тока

На катушке индуктивности ток отстает от напряжения на 90 градусов, на $\pi/2$, или, как еще говорят, на четверть периода (весь период у нас 2π или 360 градусов).

В цепи с переменным синусоидальным током, ток на конденсаторе опережает напряжение на 90 градусов, а на катушке индуктивности ток отстает от напряжения тоже на 90 градусов.

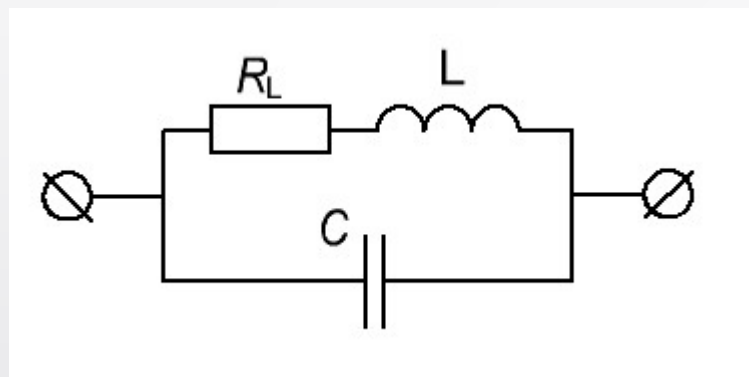
С уменьшением частоты сила тока через катушку увеличивается.

Реактивное сопротивление катушки индуктивности

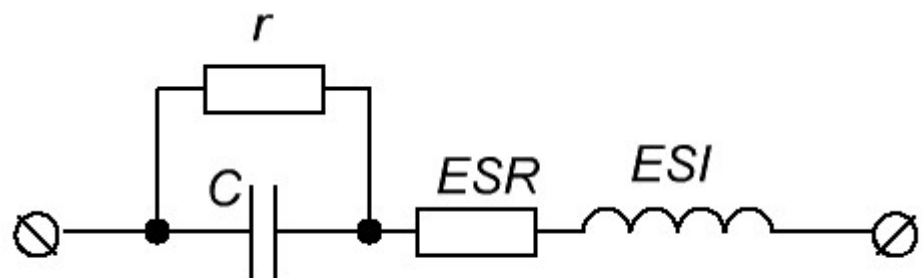
$$X_L = 2\pi FL$$

X_L — реактивное
сопротивление катушки, Ом
 π — постоянная и
равна приблизительно 3,14
 F — частота, Гц
 L — индуктивность, Генри

Эквивалентная схема реальной катушки:



эквивалентная схема реального конденсатора:



R_L — это сопротивление потерь.

L — собственно сама индуктивность катушки

C — межвитковая емкость.

r — сопротивление диэлектрика и корпуса между обкладками

C — собственно сама емкость конденсатора

ESR — эквивалентное


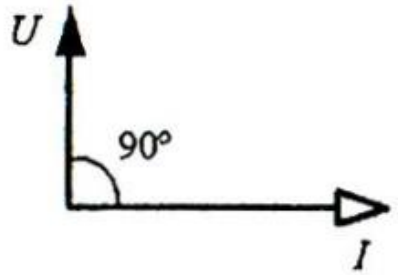
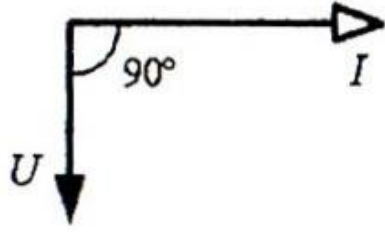
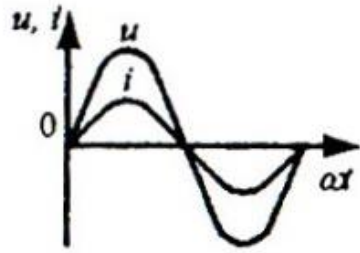
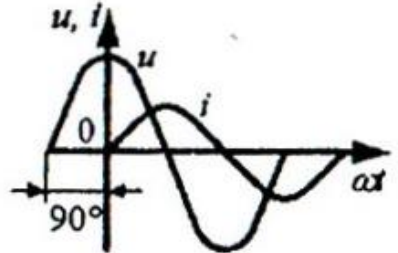
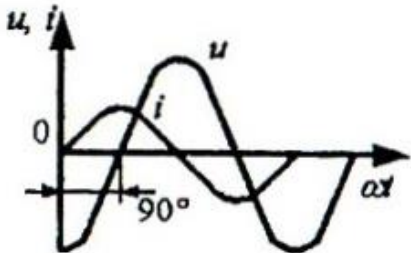
последовательное сопротивление

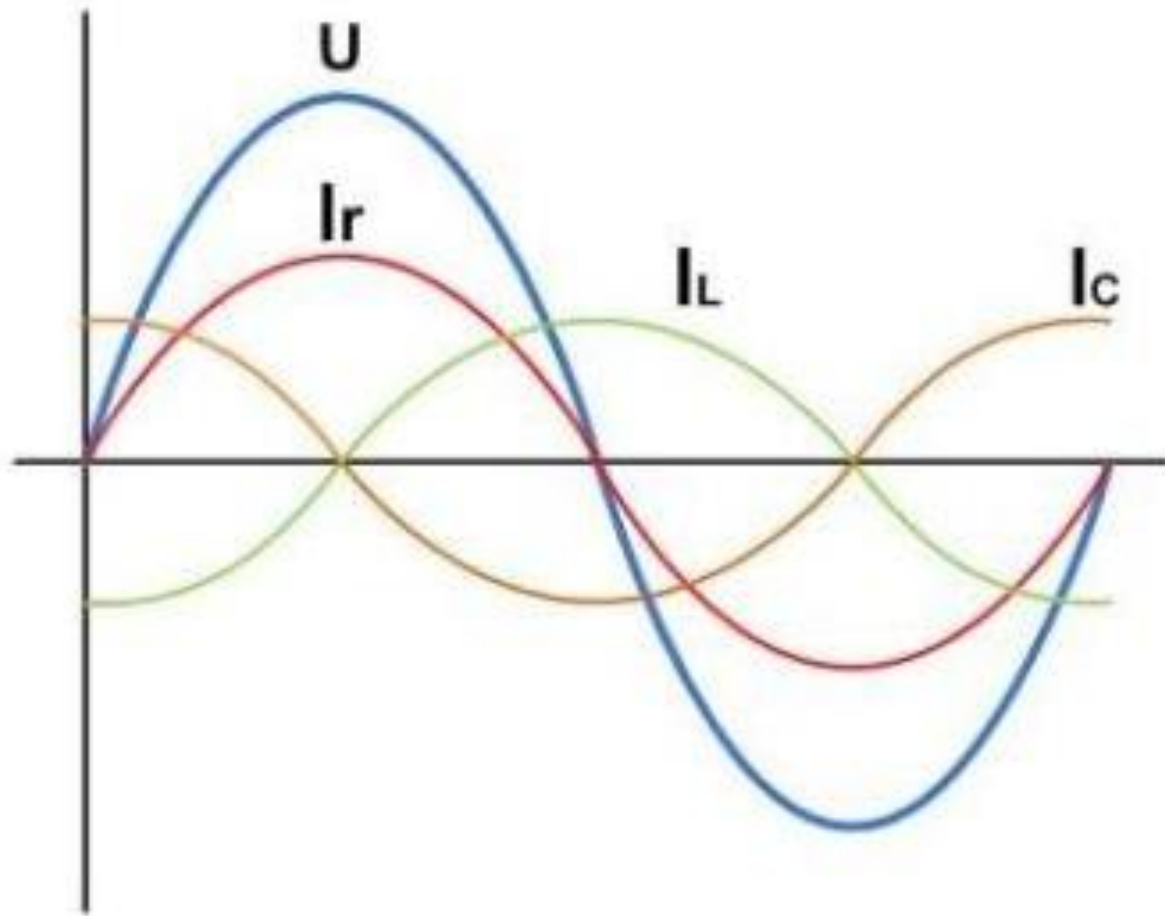
ESI (ESL) — эквивалентная

последовательная индуктивность

Параметры электрических цепей переменного тока:

	Цепь с активным сопротивлением R	Цепь с индуктивностью L	Цепь с емкостью C
Схема цепи			
Сопротивление, Ом	R – активное	$x_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$ индуктивное (реактивное)	$x_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$ емкостное (реактивное)
Закон Ома для действующих значений	$I = \frac{U}{R}$	$I = \frac{U}{x_L}$	$I = \frac{U}{x_C}$

Векторные диаграммы			
Уравнения тока и напряжения	$i = I_M \sin \omega t$ $u = U_M \sin \omega t$	$i = I_M \sin \omega t$ $u = U_M \sin(\omega t + 90^\circ)$	$i = I_M \sin \omega t$ $u = U_M \sin(\omega t - 90^\circ)$
Волновые диаграммы			
Мощность цепи	<p style="text-align: center;">активная</p> $P = UI \cos \varphi = I^2 R,$ <p style="text-align: center;">Вт</p>	<p style="text-align: center;">реактивная</p> $Q_L = UI \sin \varphi = I^2 X_L,$ <p style="text-align: center;">вар</p>	<p style="text-align: center;">реактивная</p> $Q_C = UI \sin \varphi = I^2 X_C,$ <p style="text-align: center;">вар</p>



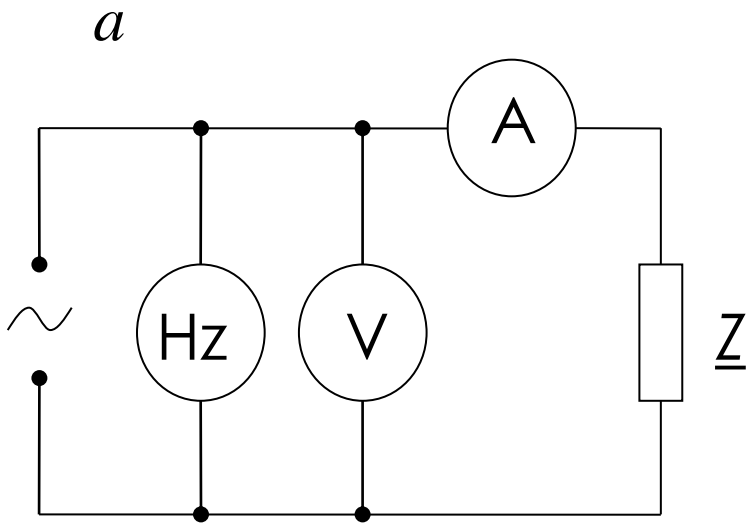
U → напряжение

I_r → активный ток

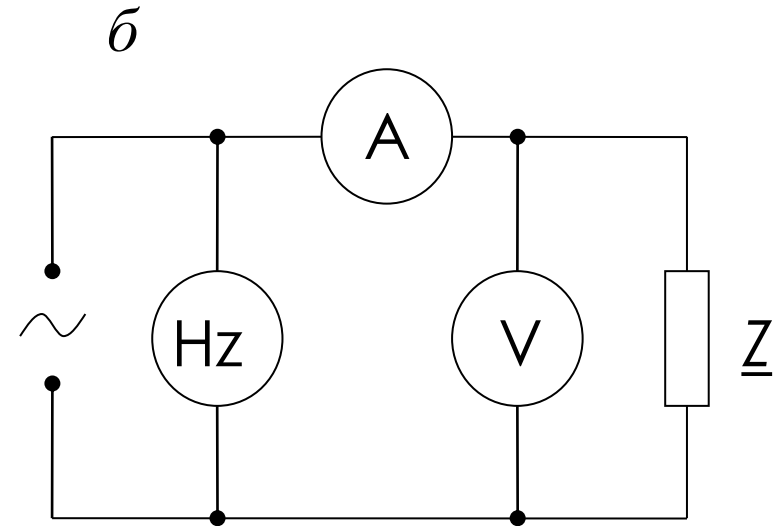
I_c → реактивный ток (емкостной)

I_L → реактивный ток (индуктивный)

Метод амперметра-вольтметра



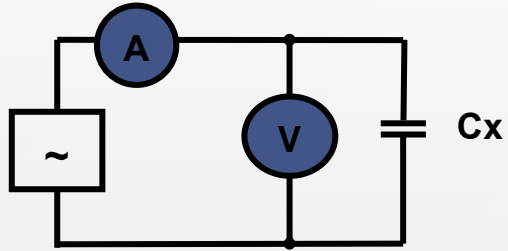
Для $Z \gg Z_A$



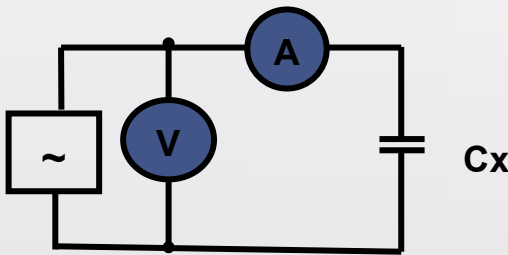
Для $Z \ll Z_V$

Установить этим методом фазовый сдвиг $\varphi = \arctg (X/R)$ невозможно.

Метод амперметра-вольтметра для емкости



Сх большого
номинала (X_c
 $< R_v$)



Сх малого
номинала (X_c
 $> R_A$)

Выбор метода измерений зависит от ожидаемого значения измеряемого сопротивления и требуемой точности. Наиболее универсальным из косвенных методов является метод амперметра-вольтметра.

Метод амперметра-вольтметра основан на измерении тока, протекающего через измеряемое сопротивление и падения напряжения на нем. Применяют две схемы измерения: измерение больших сопротивлений и измерение малых сопротивлений. По результатам измерения тока и напряжения определяют искомое сопротивление

Если пренебречь влиянием сопротивления утечки конденсатора, то

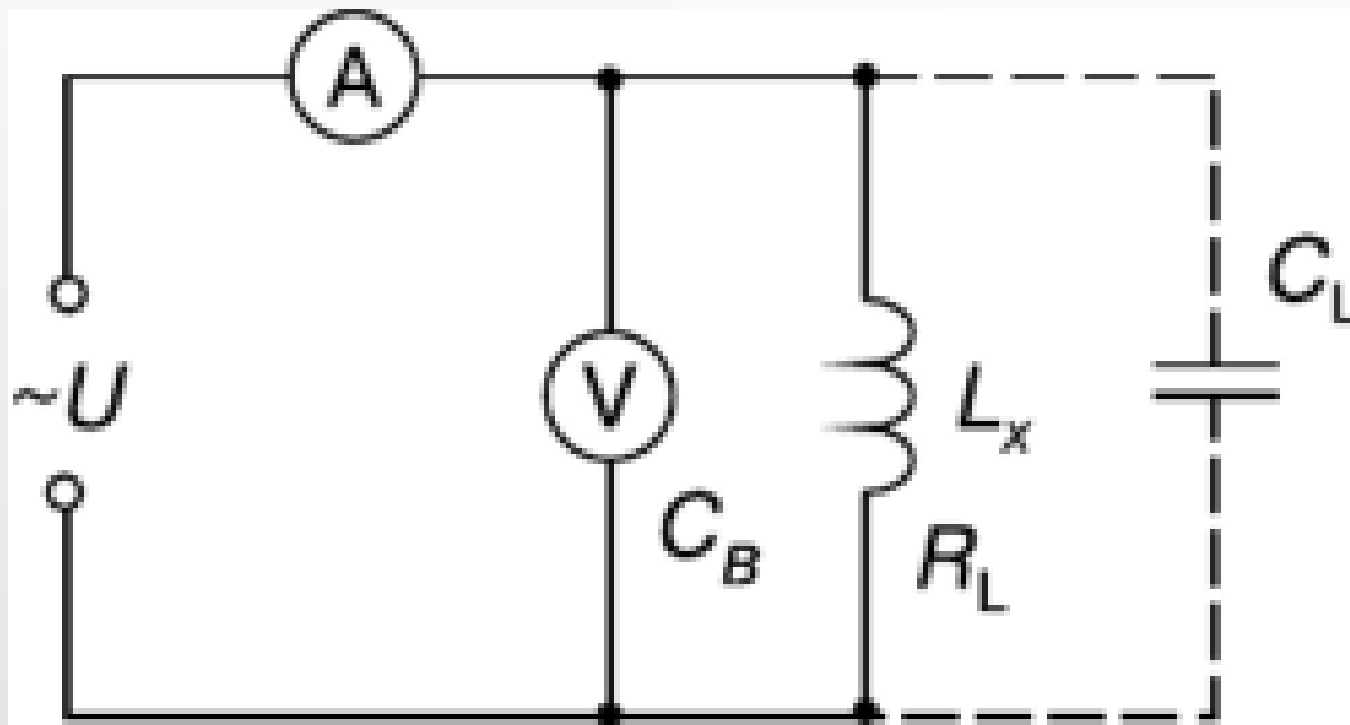
$$I \approx \frac{U}{X_C} = U 2\pi F \cdot C_x,$$

откуда

Необходим
частотомер!

Из формулы следует, что при измерении емкости конденсаторов необходимо знать частоту источника питания схемы.

Схема измерения индуктивности катушек



$$I \approx \frac{U}{X_L} = \frac{U}{2\pi F L_x},$$

откуда

$$L_x \approx \frac{U}{I \cdot 2\pi F}.$$

Измерение индуктивности катушек выполняется методом $V-A$ при соотношении $R_L \ll X_L$ (активное сопротивление катушки должно быть значительно меньше ее реактивного сопротивления).

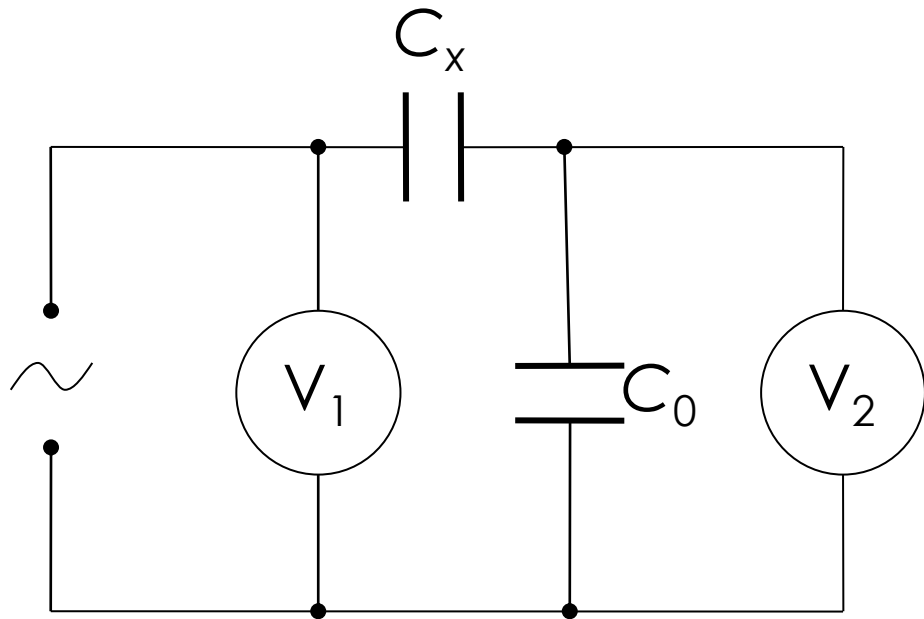
Измерение индуктивности на низких частотах будет приближительным, так как не учтено активное сопротивление катушки R_L , а на высоких частотах погрешность измерения обусловлена влиянием собственной емкости C_L катушки и входной емкости C_B вольтметра, которая, как известно, складывается с C_L :

$$C_{\text{общ}} = C_L + C_B.$$

В результате образуется параллельный колебательный контур с собственной частотой колебаний:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}}.$$

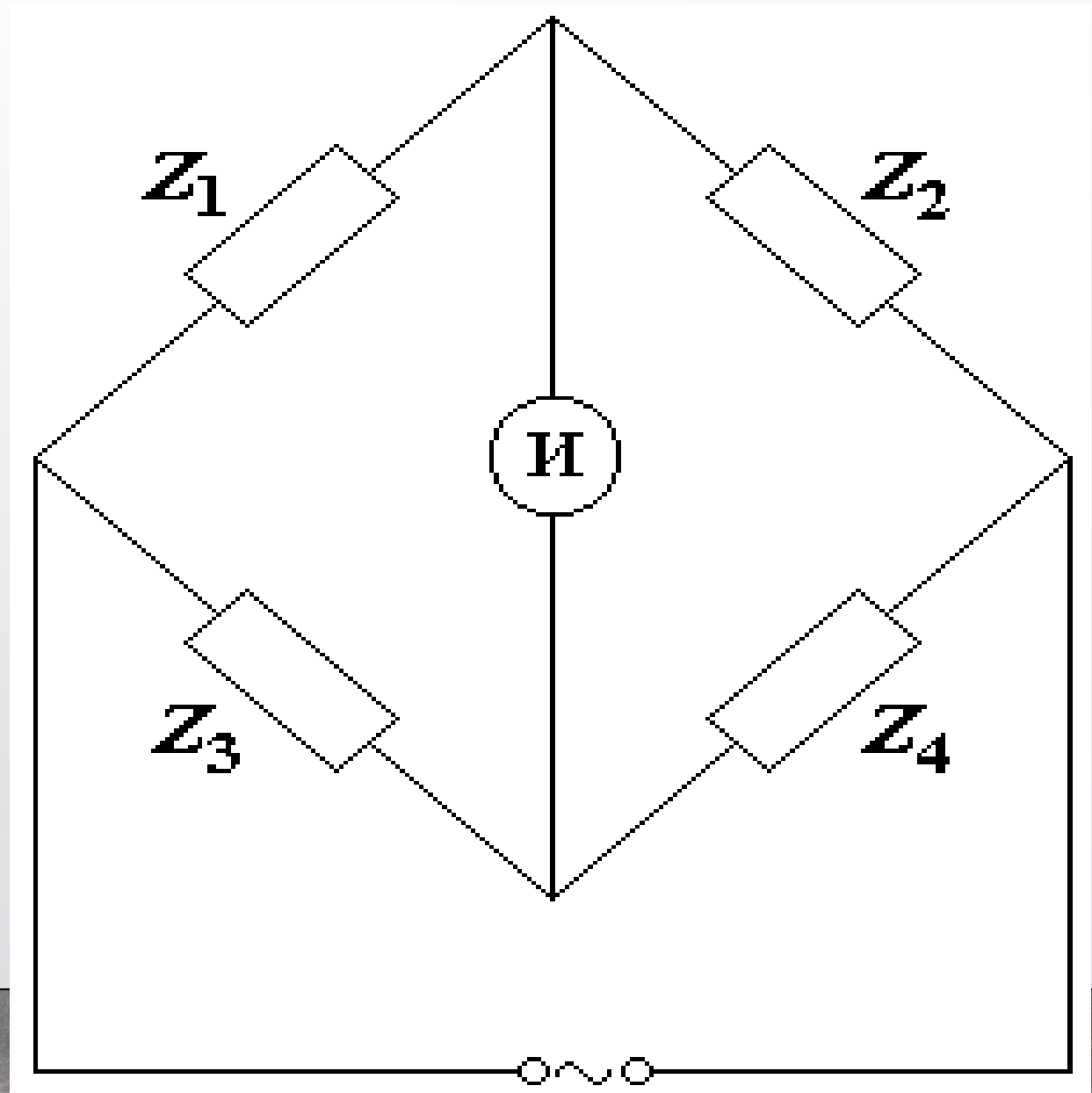
Метод двух вольтметров для измерения малых ёмкостей



Не нужно измерять частоту.

Уравновешенные мосты переменного тока

- Мосты переменного тока применяют для измерения емкости, индуктивности, взаимной индуктивности, добротности и угла потерь для электроизоляционных материалов



Одинарный мост переменного тока

$$\underline{Z}_i = R_i + j X_i = Z_i \cdot \exp(j\varphi_i)$$

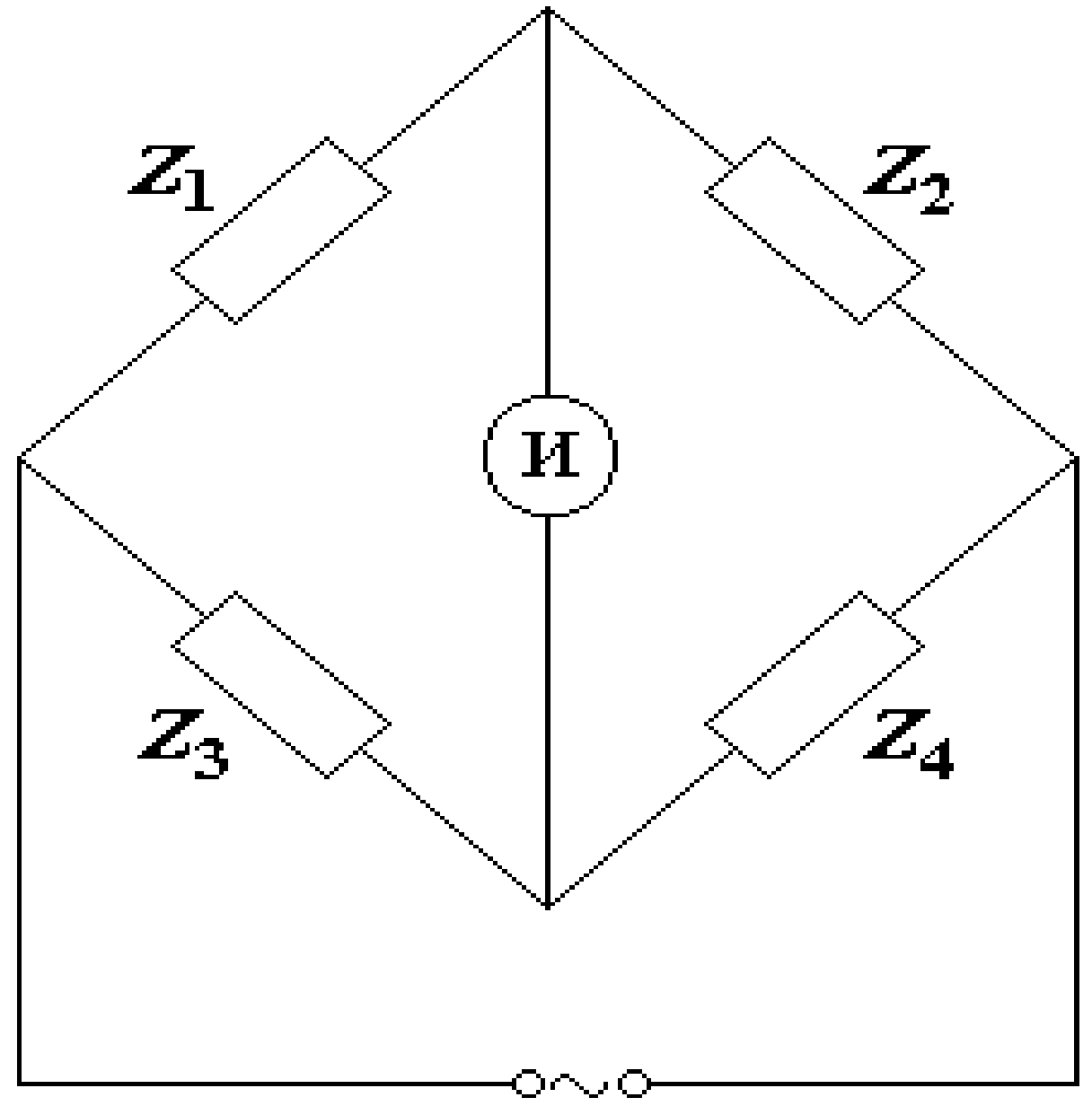
Условие равновесия моста:

$$\underline{Z}_1 \underline{Z}_4 = \underline{Z}_2 \underline{Z}_3$$



$$Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3$$

$$\varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3$$



φ_i - фазовый сдвиг между током и напряжением в соответствующем плече

Мосты для измерения индуктивности:

- Мост Максвелла-Вина.
- Мост Хея.
- Мост Оуэна.
- Мост Кемпбелла.

Мосты для измерения емкостей:

- Мост Шеринга.
- Мост Вина


Мост Вина

Назначение: измерение ёмкости и активного сопротивления

Особенности схемы:

$$\varphi_2 = \varphi_4 = 0, \varphi_1 < 0, \varphi_3 < 0$$

Условие равновесия в комплексном виде:


$$(R_x - j/\omega C_x) R_4 = (R_3 - j/\omega C_3) R_2$$

Рабочие формулы моста:

$$R_x = R_3 R_2 / R_4$$

$$C_x = C_3 R_4 / R_2$$

Мост Максвелла – Вина

Назначение: измерение индуктивности и активного сопротивления

Особенности схемы:

$$\varphi_2 = \varphi_3 = 0, \varphi_1 > 0, \varphi_4 < 0$$

Условие равновесия в комплексном виде:

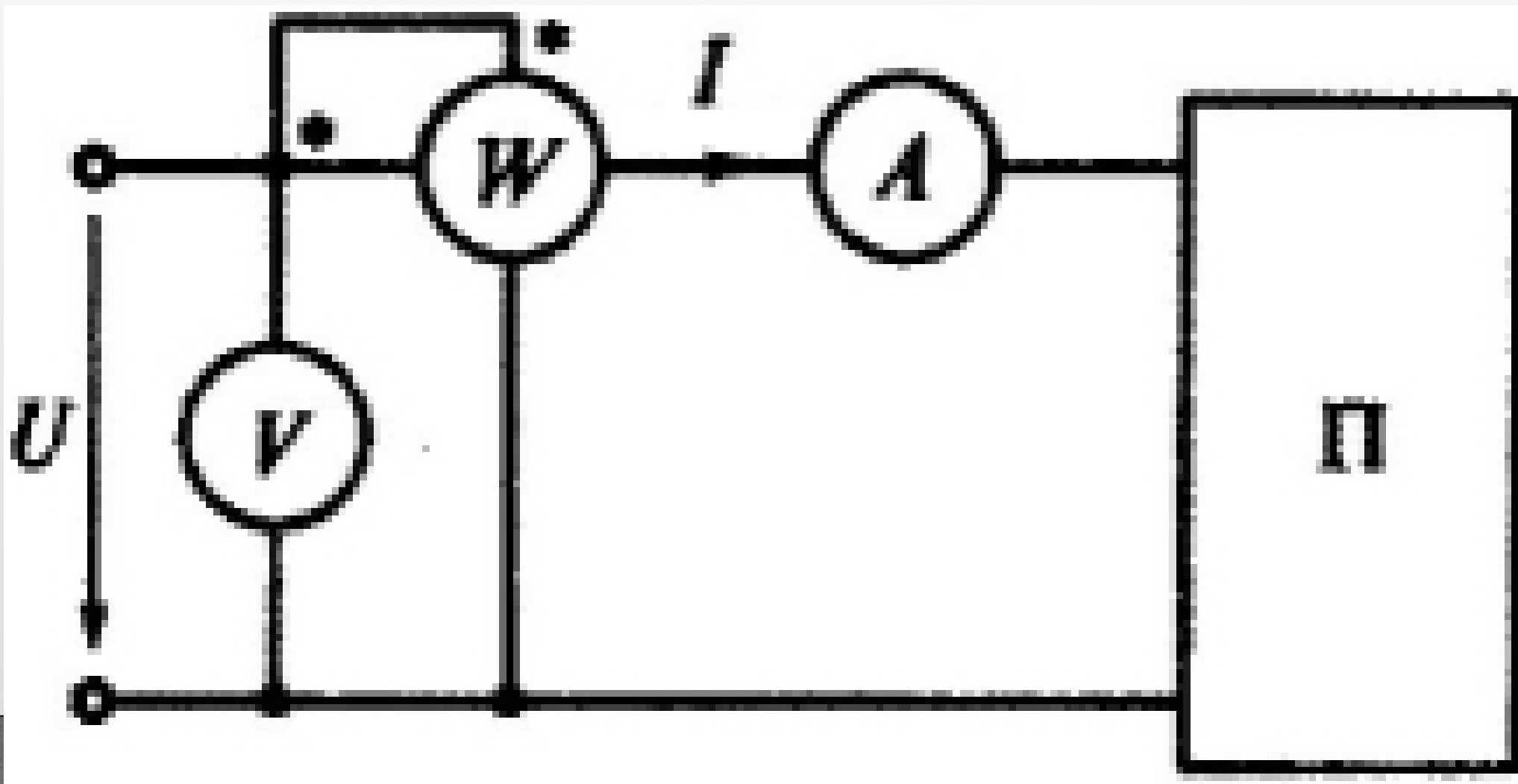
$$(R_x + j\omega L_x) / (1/R_4 + j\omega C_4) = R_2 R_3$$

Рабочие формулы моста:

$$R_x = R_3 R_2 / R_4$$

$$L_x = C_4 R_2 R_3$$

Схема измерения индуктивности и емкости по методу амперметра — вольтметра — ваттметра



Сначала измеряют ток I , напряжение U и мощность P . Затем вычисляют активное сопротивление приемника $R = P / I^2$, полное сопротивление приемника $Z = U / I$, реактивное сопротивление приемника

$$X = \sqrt{Z^2 - R^2}.$$

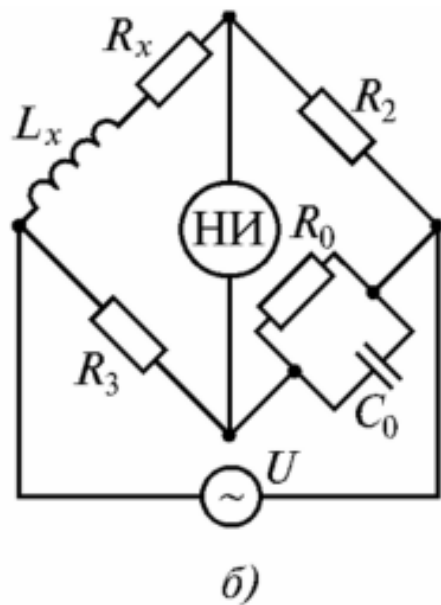
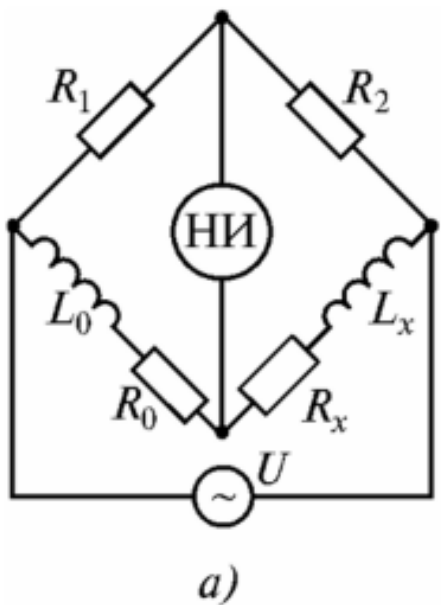
Для определения индуктивности пользуются

$$L = X_L / \omega$$

емкости находят

$$C = 1 / (\omega X_C).$$

Добротность — параметр колебательной системы, определяющий ширину резонанса и характеризующий, во сколько раз запасы энергии в системе больше, чем потери энергии за время изменения фазы на 1 радиан. То есть, чем выше добротность колебательной системы, тем меньше потери энергии за каждый период и тем медленнее затухают колебания. Обозначается символом Q .



Схемы мостов для измерения индуктивностей и их добротностей с образцовыми элементами: а — катушкой; б — конденсатором