

Мостовая схема на переменном токе

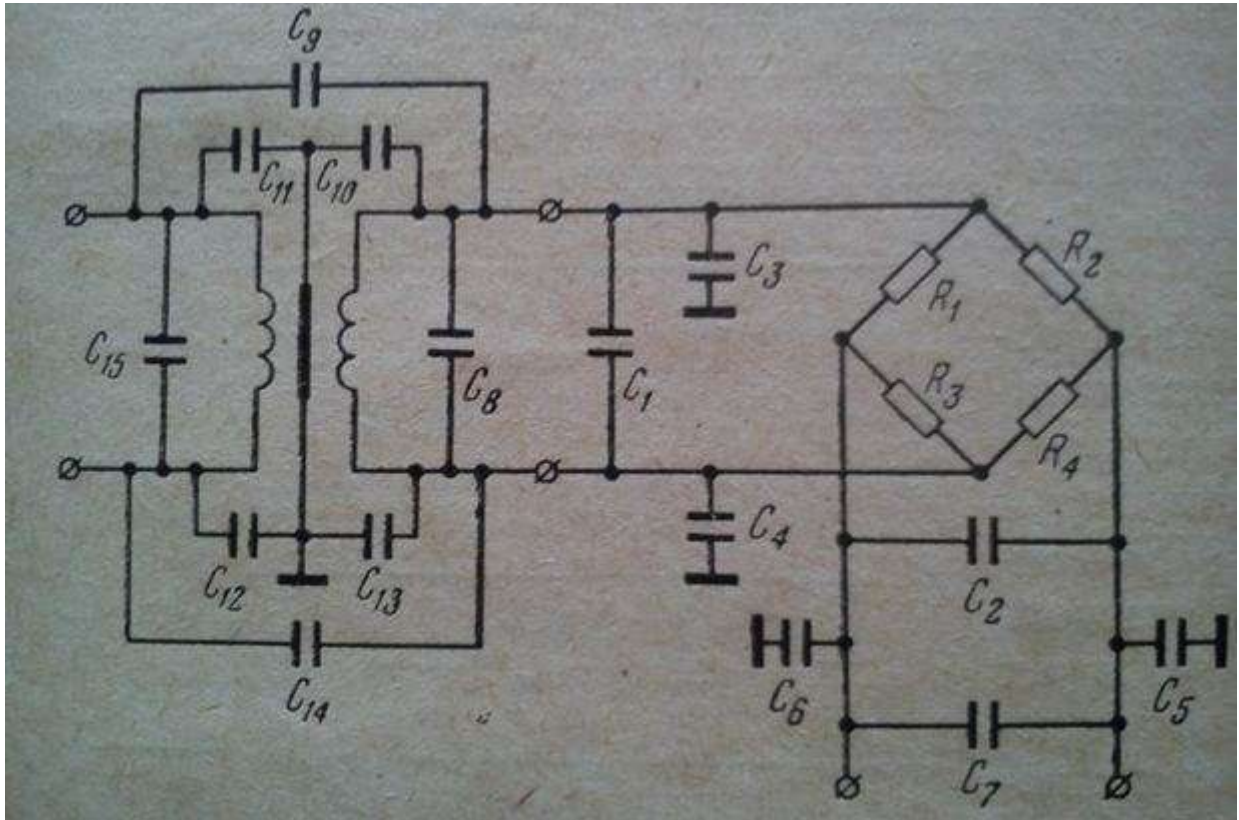


Рис. 10. Схема измерительного тензометрического моста с учетом емкостей: C₁ и C₂- межпроводных линий связи; C₃ – C₆- линий связи относительно земли; C₇- входной емкости аппаратуры; C₈ – C₁₅- питающего измерительную схему трансформатора.

Для уменьшения наводок один из узлов моста должен быть заземлен. В зависимости от заземленного узла часть емкостей, показанных на рис 10, воздут в схему измерительного моста. Мосты с заземленным полюсом источника питания в дальнейшем будем называть мостом класса I (рис 11,а) а с заземленной измерительной диагональю – мостами класса II (рис 11,б).

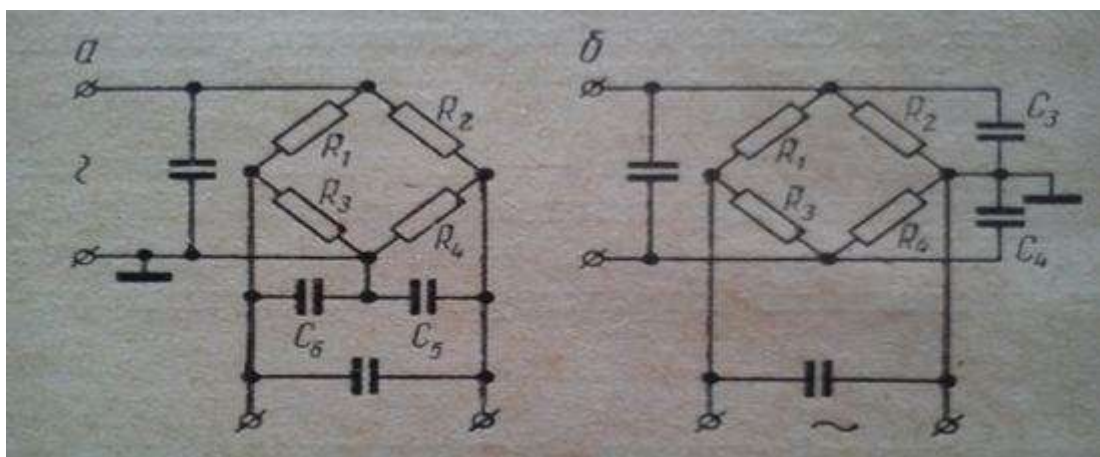


Рис.11. Эквивалентные схемы измерительных мостов: а – мост класса I; б – мост класса II

Как следует из рис. 11, у мостов класса I емкости проводов измерительной диагонали относительно земли входят в схему моста, два плеча которого $Z_3 = \frac{R_3}{1+j\omega C_6 R_3}$ и $Z_4 = \frac{R_4}{1+j\omega C_5 R_4}$ становится комплексный. Для равновесия мостов класса II существенными становятся емкости

проводов линии питания относительно земли так как они входят непосредственно в схему моста и его плечи $Z_2 = \frac{R_2}{1+j\omega C_3 R_2} = Z'_2 e^{j\varphi_2}$ и $Z_4 = \frac{R_4}{1+j\omega C_4 R_4} = Z'_4 e^{j\varphi_4}$ становятся комплексными.

В приведенных формулах: ω – угловая частота (частота несущей), Z – полное сопротивление плеча, φ – аргумент комплексного плеча Z , Z' – модуль.

Условие равновесия моста в общем случае может быть записано уравнение $Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3$, которое применительно к рассматриваемым случаям может быть приведено к системе уравнений:

Для моста класса I

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{Z_3}{Z_4} \text{ и } \varphi_3 - \varphi_4 = 0;$$

Для моста класса II

$$\frac{R_1}{R_3} = \frac{Z_2}{Z_4} \text{ и } \varphi_2 - \varphi_4 = 0;$$

Отличие начальных сопротивлений датчиков и неравенство вносимых в схему моста емкостей ($C_6 \neq C_5$ и $C_3 \neq C_4$) вызывают необходимость комплексного начального уравнивания моста по модулю и фазе. Начальное статическое уравнивание моста по двум параметрам можно выполнить переменными сопротивлениями R и емкостью C по рис 12, а и б. Мосты, уравновешенные этим способом будут относиться к группе А.

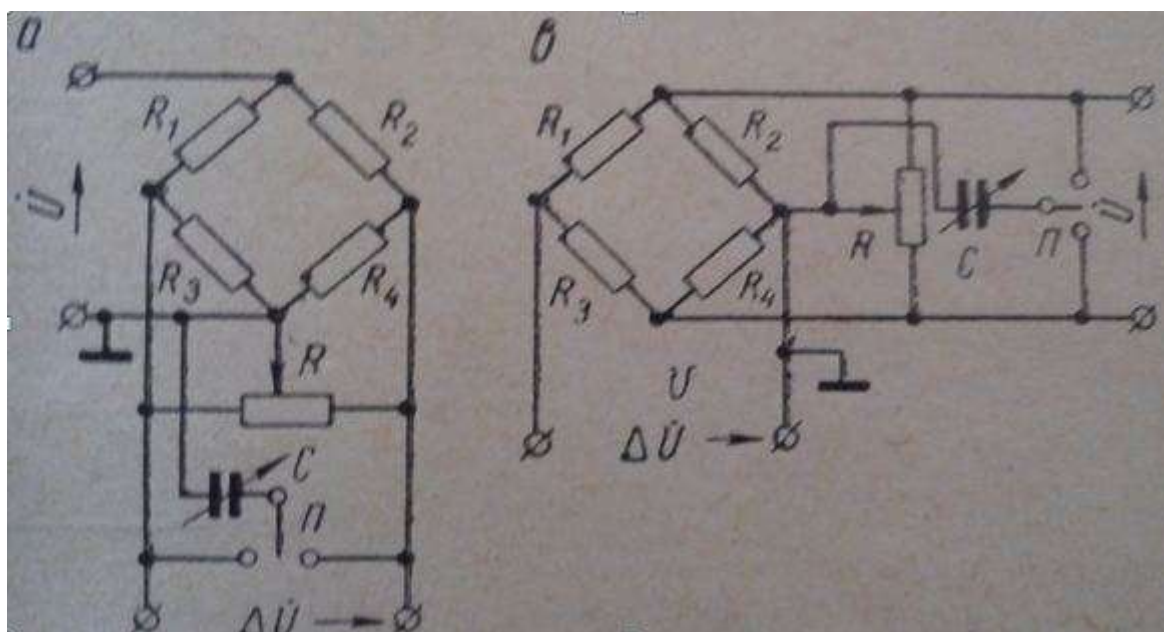


Рис. 12. Схема измерительных мостов с устройствами начального уравнивания:
а – мост класса IA; б – то же.

Для определения характеристик измерительных мостов переменного тока их удобно на основании теоремы об эквивалентном генераторе представить активными двухполюсником. Э.д.с. эквивалентного генератора равна выходному напряжению моста в режиме холостого хода и может быть определена по формуле

$$\Delta U_x = I_1 Z_1 - I_2 Z_2$$

Или

$$\frac{\Delta U_x}{U} = \frac{Z_1 Z_3}{Z_1 + Z_3} - \frac{Z_2}{Z_2 + Z_4}. \quad (11)$$

Внутреннее сопротивление эквивалентного генератора равно выходному сопротивлению моста и может быть рассчитано по соотношению

$$Z_{\text{вых}} = \frac{Z_1 Z_3}{Z_1 + Z_3} + \frac{Z_2 Z_4}{Z_2 + Z_4} \quad (12)$$

Для моста класса IA, образованного датчиками с одинаковыми начальными сопротивлениями R_0 , статическими уравновешенного ($C_2 = C_3 = C$), работающего при измерении по схеме $R_1 = R_4 = R_0(1 + \alpha)$, приняв $R_5 = R_6 = \alpha R_0$, найдем

$$Z_1 = R_0(1 + \alpha);$$

$$Z_2 = R_0(1 - \alpha);$$

$$Z_3 = \frac{\alpha R_0(1 - \alpha)}{1 - \alpha + a + j\omega a R_0(1 - \alpha)};$$

$$Z_4 = \frac{\alpha R_0(1 + \alpha)}{1 + \alpha + a + j\omega a R_0(1 + \alpha)};$$

И по формуле (11) получим

$$\frac{\Delta U_x}{U} = \frac{2a\alpha(1 + 2a)}{(1 + 2a)^2 + \omega^2 C^2 a^2 R_0^2} - j \frac{2a^2 R_0 \alpha \omega C}{(1 + 2a)^2 + \omega^2 C^2 a^2 R_0^2}$$

И

$$Z_{\text{ВЫХ}} = \frac{2aR_0}{1 + 2a + j\omega CaR_0} \quad (13)$$

Согласно формуле (13), можно утверждать, что начальное уравновешивание тензометрический мост относительно напряжения несущей частоты выполняет роль амплитудного модулятора: амплитуда выходного сигнала пропорциональна измеряемым деформациям, а фаза выходного сигнала относительно фазы несущей изменяется на 180 градусов при изменении знака деформации. В общем случае между векторами выходного и входного напряжения измерительной схемы существует фазовый сдвиг. Проекцию вектора выходного напряжения на вектор напряжения питания (действительную часть комплекса $\frac{\Delta U_x}{U}$) будем называть активным выходным напряжением и напряжение, определяемое мнимым слагаемым комплекса $\frac{\Delta U_x}{U}$, - реактивным выходным напряжением. Чувствительность моста по напряжению в режиме холостого хода определим как

$$S = \frac{d \frac{\Delta U_x}{U}}{d\alpha} = S_a + jS_p = \frac{2a(1 + 2a)}{(1 + 2a)^2 + \omega^2 C^2 a^2 R_0^2} - j \frac{2\omega C a^2 R_0}{(1 + 2a)^2 + \omega^2 C^2 a^2 R_0^2} \quad (14)$$

Как следует из уравнения (14), величина ωCaR_0 , зависящая от несущей частоты $\omega = 2\pi f$ и длины соединительных линий, существенно влияет на характеристики измерительного моста: она уменьшает чувствительность моста по активному выходному напряжению и обуславливает чувствительность по реактивному выходу напряжения. Кроме того, за счет ωCaR_0 при случайных изменениях несущей частоты будет изменяться активная чувствительность S_a . Относительную оценку изменения S_a при изменении несущей на $\Delta\omega$ выполним по формуле

$$\frac{\Delta S_a}{S_a} = \frac{S_a(\omega) - S_a(\omega + \Delta\omega)}{S_a(\omega)} = 1 - \frac{(1 + 2a)^2 + C^2 a^2 R_0^2 (\omega + \Delta\omega)^2}{(1 + 2a)^2 + C^2 a^2 R_0^2 \omega^2} \quad (15)$$

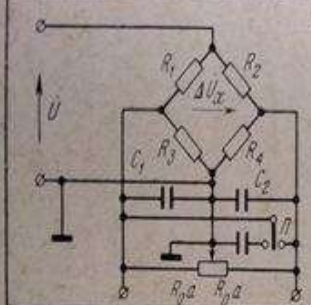
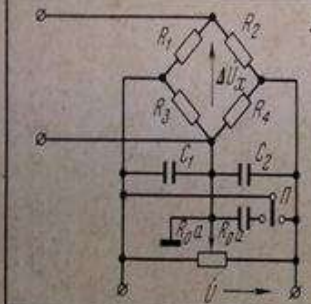
Разлагая уравнение (15) в ряд Тейлора по $\Delta\omega$ и пренебрегая величинами высших порядков малости, получим

$$\frac{\Delta S_a}{S_a} = - \frac{2C^2 a^2 R_0^2 \omega \Delta \omega}{(1 + 2a)^2 + C^2 a^2 R_0^2 \omega^2} \quad (16)$$

По формуле (16) можно установить требования стабильности частоты генератора питания моста класса IA. Для упрощения схемы генератора необходимо выбрать параметры измерительной схемы так, чтобы заданное значение $\frac{\Delta S_a}{S_a}$ обеспечивалось при возможно больших значениях $\frac{\Delta \omega_{\max}}{\omega}$. Как следует из формулы (16), требования стабильности частоты генератора можно снизить за счет датчиков с малым значением R_0 , что вряд ли рационально – при уменьшении R_0 уменьшается напряжение питания и выходное напряжение моста; за счет сокращения длины соединительных линий, что в ряде случаев невозможно; за счет рационального выбора несущей частоты и величины a . В табл. 2 сведены зависимости, характеризующие возможные схемы измерительных мостов классов IA и II A. В большинстве случаев $\omega C R_0 < 0,1$, и для этого случая можно рекомендовать выбирать значение a в пределах 5-10, при этом снижение активной чувствительности моста будет вполне допустимым.

Анализ таблицы позволяет дать рекомендации по выбору схемы моста классов IA и II A. Так, при четырех рабочих датчиках мосты классов IA и II A имеют примерно одинаковые характеристики. При двух рабочих датчиках моста IA при использовании датчиков в качестве R_1 и R_2 и моста класса II A при использовании датчиков в качестве R_1 и R_3 будут иметь удовлетворительную температурную стабильность, однако у моста класса II A $\frac{\Delta S_a}{S_a} = 0$; $S_a = 0,5$ и $S_p = 0$, а потому он может быть рекомендован как лучший. Особо следует отметить дифференциальную схему с заземленной средней точкой трансформатора. Она может быть уравновешена с помощью одного переменного сопротивления при несущих частотах до 5 кГц, не чувствительна к изменению емкостей проводов соединительной линии относительно земли и может быть рекомендована как лучшая для измерений, исключая случаи, когда влиянием побочным деформаций пренебречь нельзя.

Таблица 2

Тип моста		S_a	S_p	$R_x = \Delta U_x / U$	$Z_{\text{вых}}$	
 IA	1	$R_1 = R_2 = R_0(1 + \alpha)$, $R_3 = R_4 = R_0(1 - \alpha)$	$\frac{2a(1+2a)}{(1+2a)^2 + \omega^2 C^2 R_0^2 a^2}$	$\frac{2\omega C R_0 a^2}{(1+2a)^2 + \omega^2 C^2 R_0^2 a^2}$	$\frac{2a(1+2a - j\omega C R_0 a)\alpha}{(1+2a)^2 + \omega^2 C^2 R_0^2 a^2}$ $2R_0 a$	
	2	$R_1 = R_0(1 + \alpha)$, $R_3 = R_0(1 - \alpha)$, $R_2 = R_4 = R_0$	$\frac{2a(1+3a+2a^2)}{(1+2a)^2 + 2\omega C R_0 a^2(1+2a)}$	$\frac{2\omega C R_0 a^2}{(1+2a)^2 + 2\omega C R_0 a^2(1+2a)}$	$\frac{2a\alpha(1+3a+2a^2) + 2j\omega C R_0 a^2}{(1+2a)^2 + 2\omega C R_0 a^2(1+2a)}$ $2R_0 a$	
	3	$R_1 = R_0(1 + \alpha)$, $R_2 = R_0(1 - \alpha)$, $R_3 = R_4 = R_0$	$\frac{a(1+2a)}{(1+2a)^2 + (\omega C R_0 a)^2}$	$\frac{\omega C R_0 a^2}{(1+2a)^2 + (\omega C R_0 a)^2}$	$\frac{a\alpha(1+2a - j\omega C R_0 a)}{(1+2a)^2 + (\omega C R_0 a)^2}$ $2R_0 a$	
	 II A	1	$R_1 = R_2 = R_0(1 + \alpha)$, $R_3 = R_4 = R_0(1 - \alpha)$	$\frac{1}{2} \cdot \frac{a(1+2a)}{2[(1+a)^2 + (\omega C R_0 a)^2]}$	$\frac{\omega C R_0 a}{2[(1+a)^2 + (\omega C R_0 a)^2]}$	$\frac{\alpha}{2} \cdot \frac{\alpha a(1+a - j\omega C R_0 a)\alpha}{2[(1+a)^2 + (\omega C R_0 a)^2]}$ $2R_0 a$
		2	$R_1 = R_0(1 + \alpha)$, $R_2 = R_0(1 - \alpha)$, $R_3 = R_4 = R_0$	$\frac{1}{2}$	0	$\frac{\alpha}{2}$ $\frac{R_0(1+2a + j\omega C R_0 a)}{2(1+a + j\omega C R_0 a)}$
		3	$R_2 = R_0(1 + \alpha)$, $R_4 = R_0(1 - \alpha)$, $R_1 = R_3 = R_0$			$\frac{\alpha(1+a^2+2a-2) + 2j\omega C R_0 a^2}{2\alpha[(1+a)^2 + 2\omega C R_0 a^2]}$ $\frac{R_0(2+3a+\alpha) + 2j\omega C R_0 a}{4+a(2-\alpha) + 2j\omega C R_0 a(2-\alpha)}$

1. При $m=1$, $m=1/2$ и $m=0$ начальное равновесие моста класса IA сохраняется при изменении несущей частоты, будет находиться в равновесии по напряжениям высших гармоник.
2. Для уменьшения отношения шум/сигнал на входе усилителя, вызванного наличием высших гармоник в напряжении питания моста, сопротивление R необходимо выбирать возможно меньшей величины. При несущих частотах до 5 кгц и длине соединительных кабельных линий до 120 м для моста с $R_0=50/200$ ом при коэффициенте гармоник питающего напряжения до 5% следует выбирать $r=6/8R_0$ и $R=5/6R_0$.

При измерении переменных во время сил или моментов сигнал на выходе тензометрического моста переменного тока станет не синусоидальным и будет иметь определенный спектр.

В общем случае измеряемая сила или момент имеют сложную формулу и могут быть представлены рядом Фурье

$$P(t) = P_0 + \sum_{k=1}^{\infty} P_k \cos(k\Omega t - \varphi_k),$$

Где k - целое число, определяющее частоту гармоник.

Ряд Фурье может быть ограничен гармоникой с круговой частотой $\Omega_{\max}=k_{\max}\Omega$, не существенно влияющей на форму измеряемой силы. Анализ работы моста в данном случае показывает, что спектр колебаний напряжения на выходе моста будет состоять из колебаний с частотами несущей ω_0 и колебаний с частотами $\omega_0 \pm k_{\max}\Omega$.

Из сказанного видно, что при несущей частоте f_0 и частоте высшей гармоники измеряемого процесса F_{\max} измерительное устройство тензометрического моста должно равномерно, без амплитудных и фазовых искажений пропускать сигналы с частотами от $f_0 - F_{\max}$ до $f_0 + F_{\max}$.