ИЗМЕРЕНИЕ ВХОДНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ОБМОТОК ТОКОПРИЕМНИКОВ ТРЕХФАЗНЫХ СИСТЕМ ПРИ НАЛИЧИИ СИЛОВОГО НАПРЯЖЕНИЯ В СЕТИ

И. Ф. Огороднейчук, В. П. Солоха, В. Я. Журавлев, В. А. Секретная

Харьков

В настоящее время продолжаются поиски возможностей использования силовых сетей в качестве канала связи телемеханики. Каналам связи, созданным на основе трехфазных силовых сетей, присущи такие неоспоримые достоинства, как высокая механическая надежность, отсутствие необходимости в прокладке дополнительных кабелей и передача информации от любого задействованного объекта. К недостаткам таких каналов следует отнести: сравнительно высокий уровень действующих помех, малую изученность влияния на параметры канала связи характеристик силового оборудования и условий согласования приемо-передающей аппаратуры с трактом передачи.

При исследовании входных сопротивлений обмоток силового оборудования в зависимости от частоты $Z_{вх} = F(f)$ наиболее широко используется «метод трех вольтметров и генератора». Характеристики входного сопротивления силовых трансформаторов, асинхронных двигателей, синхронных двигателей и генераторов, различного рода преобразователей, а также сетей в целом снимаются при отсутствии силового напряжения основной гармоники $f = 50$ *гц*.

Рассмотрев схему замещения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором для низких частот[1], видим, что модуль входного сопротивления зависит не только от частоты, но и от момента нагрузки M, пропорционального току основной гармоники.

Мнение о том, что входное сопротивление обмоток двигателей зависит от частоты и не зависит от тока нагрузки, требует проверки. Действительное входное сопротивление полной схемы замещения состоит из входного сопротивления обмоток статора и сопротивления, вносимого ротором.

Циклическое изменение магнитной проницаемости стали под воздействием периодической составляющей намагничивающего тока ($f = 50$ *гц*) приводит к изменению индуктивности обмоток статора, в основном определяющей величину модуля входного сопротивления. Следовательно, при наличии в распределительных сетях силового напряжения входное сопротивление обмоток токоприемников с нелинейными элементами не остается постоянным, а изменяется в определенных пределах $Z_{вх\ min} - Z_{вх\ max}$ с частотой основной гармоники тока в данной цепи.

[1] Рассматривается диапазон частот, в котором не проявляются волновые свойства обмоток токоприемников, и обмотки токоприемников представлены сосредоточенными параметрами.

Применение «метода трех вольтметров» для измерения входных сопротивлений силовых токоприемников не отражает действительных параметров оборудования сети, а сводится лишь к простому измерению сопротивлений обмоток статора асинхронного двигателя.

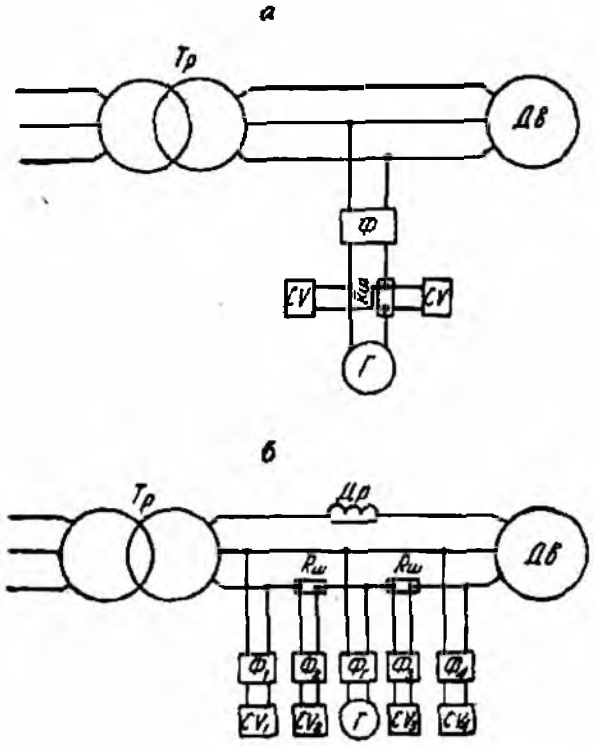

Рис. 1. Схемы включения приборов для измерения:
а — входного сопротивления системы; *б* — входного сопротивления отдельных токоприемников.

Чтобы выяснить влияние силового напряжения и токов нагрузки на изменение параметров сети $[Z_{вх.\,с} = F(f)]$ в целом и отдельных токоприемников трансформатора $[Z_{вх.\,тр} = F(f)]$ двигателей $[Z_{вх.\,дв} = F(f)]$, различного рода преобразователей $[Z_{вх.\,пр} = F(f)]$ и т. д. предлагается метод селективных измерений входных сопротивлений токоприемников в рабочем режиме силового оборудования. Сущность его заключается в известном принципе измерения падений напряжений на измеряемом сопротивлении нагрузки и последовательно включенном с ним заранее известном активном сопротивлении измерительного шунта. В данном случае искомое сопротивление может быть определено по формуле

$$Z_{вх} = \frac{U_н}{U_R} R_ш, \qquad (1)$$

где $Z_{вх}$ — модуль входного сопротивления обмоток токоприемника;

$U_н$ — падение напряжения на сопротивлении нагрузки;

U_R — падение напряжения на сопротивлении;

$R_ш$ — величина активного сопротивления измерительного шунта.

Практическая реализация метода измерений при силовом напряжении в сети требует применения селективных измерительных вольтметров и ограждения измерительных цепей от основной гармоники напряжения $f = 50$ *гц*. Это достигается при помощи заградительных фильтров, настроенных на данную частоту.

Схема для измерения входных сопротивлений приведена на рис. 1, *а*, 1, *б*. Точность результатов измерений входных сопротивлений обмоток электрических машин, объединенных в определенную систему, может быть обеспечена лишь в том случае, когда исключено взаимное влияние сопротивлений обмоток различных токоприемников друг на друга.

Трехфазные системы с незаземленной нейтралью в предлагаемой системе измерений имеют схемы соединения обмоток, аналогичные измерительным мостам, и при условии симметрии фаз точно соответствуют им (рис. 2).

При рассмотрении схем (рис. 2) видно, что это условие может быть выполнено тогда, когда ток измерительного генератора в фазе, не участвующей в измерениях (в данном случае в фазе С) равен нулю, т. е. соблюдено условие уравновешенного моста:

для рис. 2, *а* $Z_{CA}Z_{BC} = Z_{BC}Z_{CA}$; (2)

для рис. 2, *б* $Z_A Z_B = Z_B Z_A$;

» » 2, *в* $Z_{CA} Z_B = Z_{BC} Z_A$.

Разность потенциалов в средних точках плечей делителей, образованных обмотками токоприемников, равна нулю $\dot{U}_1 - \dot{U}_2 = 0$. При условии симметрии

$$Z_A = Z_B = Z_C = Z_1;\ Z'_A = Z'_B = Z'_C = Z'_1 \ (\lambda/\lambda)$$

и

$$Z_{AB} = Z_{BC} = Z_{CA} = Z_1;\ Z'_{AB} = Z'_{BC} = Z'_{CA} = Z'_1 \ (\Delta/\Delta)$$

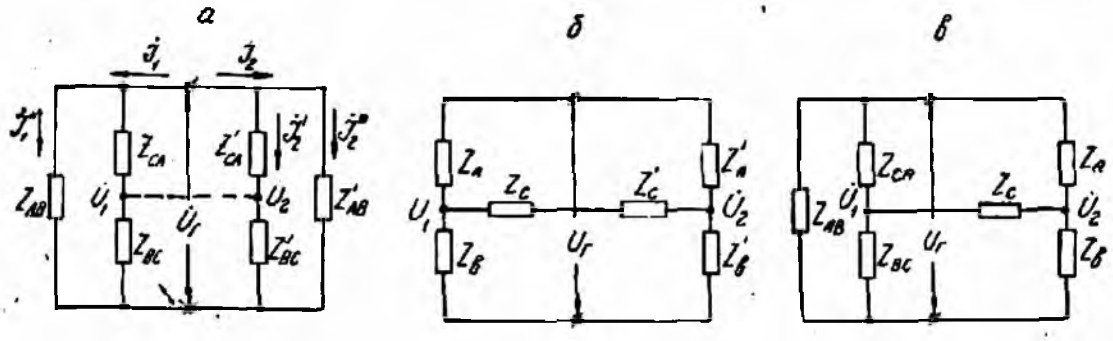

Рис. 2. Измерительные цепи при различных соединениях обмоток токоприемников в трехфазной системе:

а — схемы соединения обмоток токоприемников при системе $\frac{\Delta}{\Delta}$; *б* — схемы соединения обмоток токоприемников при системе $\frac{\lambda}{\lambda}$; *в* — схемы соединения обмоток токоприемников при системе $\frac{\Delta}{\lambda}$.

потенциалы в средних точках делителя

$$\dot{U}_1 = \frac{\dot{U}_\Gamma}{Z_A + Z_B} \cdot Z_A = \frac{\dot{U}_\Gamma}{2}$$

и

$$\dot{U}_2 = \frac{\dot{U}_\Gamma}{Z'_A + Z'_B} \cdot Z'_A = \frac{\dot{U}_\Gamma}{2},$$

т. е. $\dot{U}_1 = \dot{U}_2$ (для схемы рис. 2, *а* λ/λ).

Равенство потенциалов в средних точках делителей принятой схемы измерений в симметричной трехфазной системе сохраняется для всех схем соединения обмоток токоприемников

$$\Delta/\Delta;\ \Delta/\lambda;\ \lambda/\Delta.$$

Включение измерительного шунта (рис. 3, *а*) приводит к перераспределению сопротивлений в плечах моста и появлению тока в проводе, не участвующем в измерении.

На основании закона Кирхгофа можно составить уравнения

$$\dot{I}_a (Z'_A + Z_B) - \dot{I}_b Z_A - \dot{I}_c Z'_B = \dot{U}_\Gamma; \qquad (3а)$$

$$\dot{I}_a Z'_A + \dot{I}_b [(Z_C + Z'_C) + R_m + Z_A + Z'_A] - \dot{I}_c (Z_C + Z'_C) = 0; \qquad (3б)$$

$$\dot{I}_a Z'_B - \dot{I}_b (Z_C + Z'_C) + \dot{I}_c [(Z_C + Z'_C) + Z_B + Z'_B] = 0. \qquad (3в)$$

Произведя замену $\dot{I}_c = \dot{I}_b - \dot{I}_p$ и решая систему, получим

$$\dot{I}_p = U_\Gamma \frac{(Z_A + R_m) Z'_B - Z'_A Z_B}{k}, \qquad (4)$$

где

$$k = 4 (Z_C + Z'_C) Z_A Z'_A + 2 Z_A Z'_A (Z_A + Z'_A).$$

С учетом условий

$$Z_A = Z_B = Z_C = Z_1$$

и

$$Z'_A = Z'_B = Z'_C = Z'_1$$

получим

$$\dot{I}_p = \frac{\dot{U}_\Gamma R_ш}{6Z_1(Z_1 + Z'_1)}, \tag{5}$$

где $\dot{I}_p$ — ток асимметрии, протекающий в третьем проводе системы.

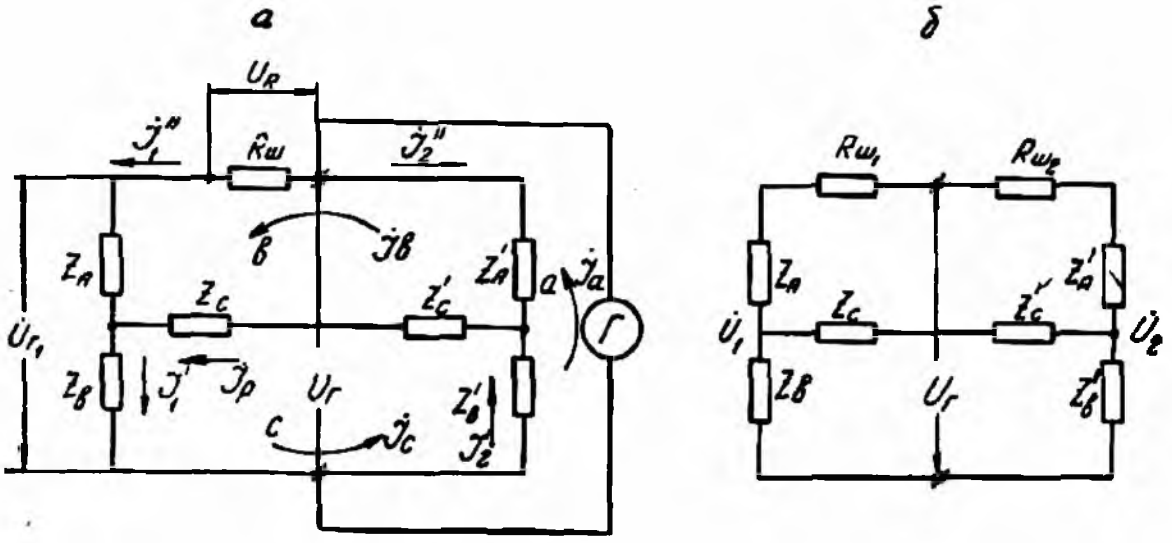

Рис. 3. Схемы включения шунтов:
а — в одно измерительное плечо; *б* — в два измерительных плеча.

Перераспределение токов в плечах измерительной схемы при включении шунта определяем с помощью уравнений

$$\ddot{I}_1 = \dot{I}_1 - \dot{I}_p; \quad \ddot{I}_2 = \dot{I}_2 + \dot{I}_p; \quad \ddot{I}'_1 = \dot{I}'_1; \quad \ddot{I}'_2 = \dot{I}'_2,$$

где

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_\Gamma}{Z_A + Z_B} = \frac{\dot{U}_\Gamma}{2Z_1},$$

$$\dot{I}'_2 = \frac{\dot{U}_\Gamma}{Z'_A + Z'_B} = \frac{\dot{U}_\Gamma}{2Z'_1}$$ — токи в сбалансированной системе.

Ток $\ddot{I}_1$ может быть выражен через напряжение генератора

$$\ddot{I}_1 = \frac{\dot{U}_\Gamma}{2Z_1} - \frac{\dot{U}_\Gamma R_ш}{6Z_1(Z_1 + Z'_1)} = \frac{\dot{U}_\Gamma}{2Z_1}\left(1 - \frac{R_ш}{3(Z_1 + Z'_1)}\right). \tag{6}$$

Напряжение на нагрузке $\dot{U}_{г_2}$

$$\dot{U}_{г_2} = \ddot{I}_1(Z_1) + (\ddot{I}_1 + \dot{I}_p)Z_1 = Z_1(2\ddot{I}_1 + \dot{I}_p) =$$

$$= Z_1\left\{2\left[\frac{\dot{U}_\Gamma}{2Z_1}\left(1 - \frac{R_ш}{3(Z_1 + Z'_1)}\right)\right] + \frac{\dot{U}_\Gamma R_ш}{6Z_1(Z_1 + Z'_1)}\right\} =$$

$$= \frac{\dot{U}_\Gamma}{3(Z_1 + Z'_1)}\left[3(Z_1 + Z'_1) - \frac{R_ш}{2}\right] = \dot{U}_\Gamma\left[1 - \frac{R_ш}{6(Z_1 + Z'_1)}\right]. \tag{7}$$

По условию измерения входное сопротивление в заданной фазе

$$Z_{вх} = \frac{\dot{U}_н}{\dot{U}_R} R_ш = \frac{U_н}{I_1}.$$

Поэтому при разбалансе системы входное сопротивление

$$Z'_{вх} = \frac{\dot{U}_Г}{\dot{I}'_1} = \frac{\dot{U}_Г\left[1 - \frac{R_ш}{6(Z_1 + Z'_1)}\right]}{\frac{\dot{U}_Г}{2Z_1}\left[1 - \frac{R_ш}{3(Z_1 + Z'_1)}\right]} = Z_1\left[\frac{6(Z_1 + Z'_1) - R_ш}{3(Z_1 + Z'_1)}\right]. \quad (8)$$

Относительная погрешность измерения в системе включения обмоток токоприемников λ/λ

$$\Delta = \frac{Z_{вх} - Z'_{вх}}{Z_{вх}} = \frac{R_ш}{6(Z_1 + Z'_1)} \quad (9)$$

в основном определяется величиной активного сопротивления шунта ($R_ш$).

Для систем Δ/Δ; Δ/λ; λ/Δ выражения для определения погрешности измерений могут быть выведены аналогично, однако, независимо от схем соединения обмоток токоприемников; сопротивления измерительных шунтов должны быть по возможности меньше. Схема позволяет производить измерения входных сопротивлений обмоток двух токоприемников (например, трансформатора и двигателя) при использовании одного измерительного генератора и включении двух шунтов (рис. 1, *б*). В данном случае создаются условия, при которых погрешность, вносимая измерительным шунтом, может быть полностью компенсирована, т. е. тогда, когда

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2.$$

Для системы λ/λ по условию $\dot{U}_1 - U_2 = 0$ (рис. 3, *б*) можно записать

$$\frac{\dot{U}_Г(R_{ш_1} + Z_A)}{R_{ш_1} + Z_A + Z_B} - \frac{\dot{U}_Г(R_{ш_2} + Z'_A)}{R_{ш_2} + Z'_A + Z_B} = 0,$$

или при $Z_A = Z_B = Z_C = Z_1$,

и

$$Z'_A = Z'_B = Z'_C = Z'_1,$$

$$\frac{U_Г(R_ш + Z_1)}{R_{ш_1} + 2Z_1} - \frac{\dot{U}_Г(R_{ш_2} + Z'_1)}{R_{ш_2} + 2Z'_1} = 0$$

получим

$$\frac{R_{ш_1}}{R_{ш_2}} = \frac{Z_1}{Z'_1}. \quad (10)$$

Для системы Δ/Δ

$$\frac{\dot{U}_Г}{2}\left(1 - \frac{1}{1 + \frac{2}{3}\frac{Z_1}{R_{ш_1}}}\right) - \frac{\dot{U}_Г}{2}\left(1 - \frac{1}{1 + \frac{2}{3}\frac{Z'_1}{R_{ш_2}}}\right) = 0$$

имеем

$$\frac{R_{ш_1}}{R_{ш_2}} = \frac{Z_1}{Z'_1}. \quad (11)$$

Для системы λ/Δ

$$\frac{U_\Gamma (R_{ш_1} + Z_1)}{(R_{ш_1} + 2Z_1)} - \frac{U_\Gamma}{2}\left(1 - \frac{1}{1 + \frac{2Z_2}{3R_{ш_2}}}\right) = 0$$

$$\frac{R_{ш_1}}{R_{ш_2}} = -\frac{3}{Z_2}(Z_1 + R_{ш_1}) \qquad (12)$$

и для системы Δ/λ

$$\frac{U_\Gamma}{2}\left(1 - \frac{1}{1 + \frac{2Z_1}{3R_{ш_1}}}\right) - \frac{U_\Gamma (R_{ш_2} + Z_2)}{R_{ш_2} + 2Z_2} = 0$$

это же отношение

$$-\frac{R_{ш_2}}{R_{ш_1}} = \frac{1}{3Z_2}(Z_1 + R_{ш_1}) \qquad (13)$$

имеет знак отрицательного значения сопротивления.

В системах λ/Δ и Δ/λ условий балансировки измеряемых плеч добиться нельзя и избавиться от погрешности, вносимой в измерения шунтом, невозможно. В общем случае в трехфазных системах из-за разброса параметров обмоток токоприемников полной симметрии практически быть не может. Тогда для увеличения точности результатов измерений входных сопротивлений необходимо в свободный провод включать дроссель с повышенным реактивным сопротивлением.

Измерения входных сопротивлений обмоток трансформатора типа АП-2,5 и асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором сверла СЭР-19А в реальных условиях были проведены по схеме, приведенной на рис. 1, *б*. На рис. 4 даны кривые изменения входных сопротивлений по схеме фаза—фаза обмоток токоприемников в зависимости от частоты и нагрузок по основному току $f = 50$ *гц*.

При отсутствии силового напряжения сети кривые входных сопротивлений $Z_{вх} = F(f)$, полученные в результате измерений методом трех вольтметров и методом селективных измерений, полностью совпали во всем исследуемом частотном диапазоне (кривые *1*, *2*, *5*, *6*). Включение под напряжение обмоток исследуемых токоприемников привело к резкому снижению их входных сопротивлений. Изменение характера силовой нагрузки также сказывается на величине модуля входного сопротивления и особенно обмоток асинхронного двигателя. Следует также отметить, что приборы регистрируют усредненное значение входного сопротивления на определенной фиксированной частоте, так как модуль его изменяется в соответствии с амплитудой основного тока.

Проведение практических замеров требует хорошей подготовки измерительной аппаратуры и тщательного производства замера. Несоблюдение этих условий ведет к дополнительным погрешностям измерений, которые могут возникнуть:

1) при несоответствии характеристик фильтров присоединения;

2) при неточной настройке на заданную частоту и низких входных сопротивлениях селективных вольтметров;

3) при использовании одного селективного вольтметра для одновременного замера падений напряжения на нагрузке и на измерительном шунте.

В измерительной схеме следует применять однотипные заградительные фильтры, настроенные на частоту 50 *гц*, с большой крутизной характеристики среза и одинаковыми частотными характеристиками коэффициента передачи. Качество настройки селективного прибора на заданной частоте можно дополнительно контролировать при помощи электронного осциллографа.

Использование одного селективного вольтметра для проведения измерений в условиях сравнительно высоких и быстро меняющихся уровней помех приведет к заведомо искаженным результатам измерений; ошибки

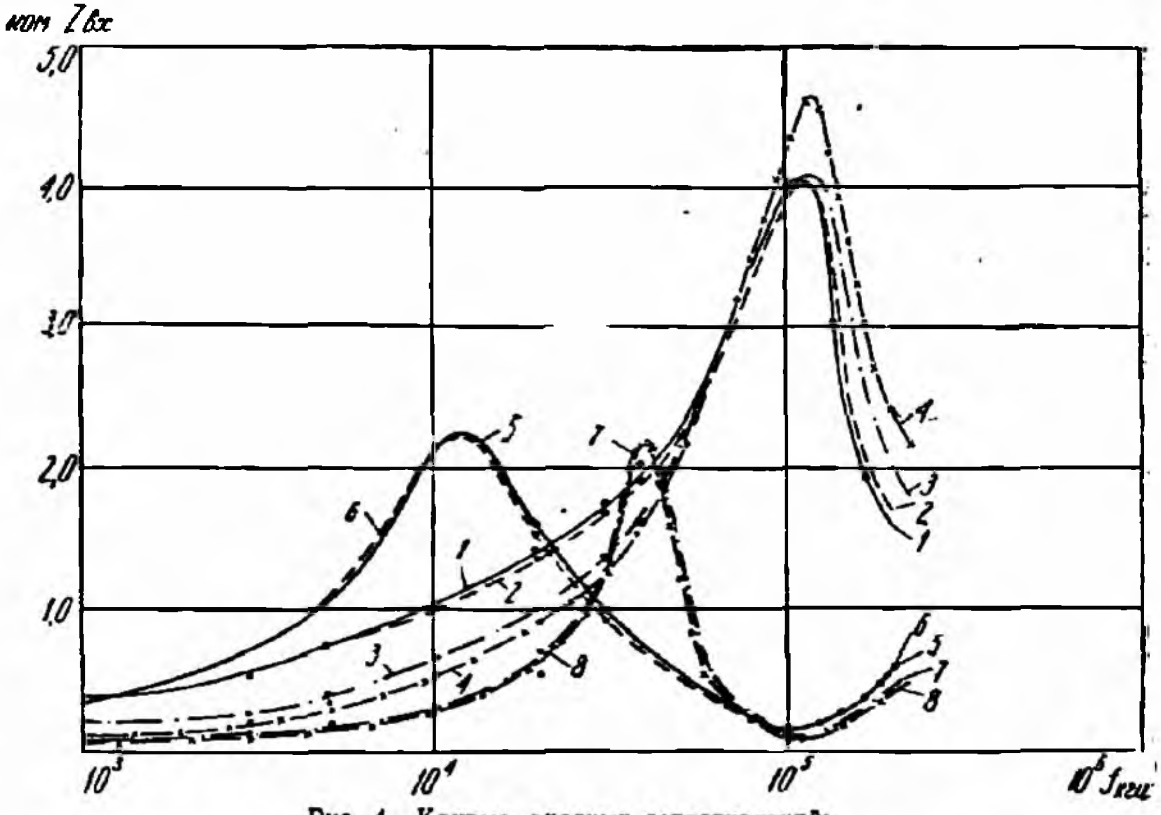

Рис. 4. Кривые входных сопротивлений:

1 — входное сопротивление двигателя в трехфазной системе; *2* — входное сопротивление отдельного двигателя; *3*, *4* — входное сопротивление двигателя в системе при $I_н = 3{,}7$ *а*; $I_н = 5{,}6$ *а*; *5* — входное сопротивление трансформатора в системе сети; *6* — входное сопротивление отдельного трансформатора; *7*, *8* — входное сопротивление трансформатора при токах нагрузки $I_н = 3{,}7$ *а*; $I_н = 5{,}6$ *а*.

измерений могут достигать весьма большой величины. Включение двух приборов и одновременное снятие их показаний при использовании мощного измерительного генератора более 5 *вт* сводит до минимума погрешность, возникающую в результате воздействия помех.