

ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И УСТРОЙСТВА

УДК 621.3.083.4

Л. РИППЕР
(Брно, ЧССР)

ФАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ИНДИКАТОР НУЛЯ ДЛЯ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МОСТОВ*

Для точных высокочастотных измерений импедансов обыкновенно применяется мостовой метод. В качестве индикатора нуля используется в большинстве случаев супергетеродинный приемник, к которому подключен (на выходе блока промежуточной частоты) высокочастотный вольтметр. При равновесии моста сигнал на входе приемника исчезает и показание становится минимальным. Величина этого показания колеблется около некоторого значения и пропорциональна в основном собственному шуму приемника. Чтобы правильно уравновесить мост, необходимо выводить мост из состояния равновесия в обе стороны до тех пор, пока не станет заметным увеличение показания индикатора. Для обеспечения точных измерений необходимо увеличить чувствительность индикатора, а следовательно, снизить величину шума до минимума при сохранении полного усиления приемника. Уменьшение шума достигается путем применения деталей с малым коэффициентом шума в соответствующей схеме и сужением полосы приемника. Однако приемник с узкой полосой пропускания не может обеспечить необходимой стабильности амплитудно-частотной характеристики даже при использовании кварцевого фильтра промежуточной частоты, при помощи которого можно добиться сужения ширины полосы до нескольких десятков герц. Существенного уменьшения влияния шума можно добиться путем включения на выходе приемника фазочувствительного вольтметра. Оба охарактеризованных выше варианта построения индикаторов (с амплитудным и фазочувствительным вольтметром) были использованы в исследовательской лаборатории физических эталонов Народного предприятия Тэсла Брно при разработке аппаратуры для питания и индикации баланса калибровочных высокочастотных мостов. Помимо повышения чувствительности, применение фазочувствительного вольтметра, благодаря лучшему соотношению сигнал/шум, привело к повышению точности измерения на двойном Т-образном мосте и дало возможность независимо уравнивать активную и реактивную составляющие измеряемого импеданса.

* Материал доложен на VIII Всесоюзной конференции по автоматическому контролю и методам электрических измерений в сентябре 1966 года в Новосибирске.

несущей частотой f_0 . Этот сигнал модулирован по амплитуде и фазе флюктуационным процессом. Напряжение шума $U_{ш}$ можно определить или векторным способом, или при помощи ортогональных слагаемых:

$$U_{ш}(t) = R(t) \cos [\omega_0 t + \varphi(t)] = A(t) \cos \omega_0 t + B(t) \sin \omega_0 t, \quad (1)$$

где $R(t)$ — флюктуационная огибающая амплитуды напряжения шума (только со знаком плюс);
 $\varphi(t)$ — флюктуационно переменная фаза (вероятность появления во всех четырех квадрантах одинакова);

$$A(t) = R(t) \cos \varphi(t);$$

$$B(t) = -R(t) \sin \varphi(t).$$

Напряжение шума $U_{ш}(t)$ можно представить в виде двух составляющих: первая составляющая в фазе с полезным сигналом [огибающая слагаемой $A(t)$]; вторая составляющая со сдвигом по фазе $\pi/2$ по отношению к сигналу [ее огибающая $B(t)$]. Обе составляющие являются тоже флюктуационными величинами и их соотношение следующее:

$$\bar{A}^2 = \bar{B}^2 = 1/2 \bar{R}^2 = \int_0^{\infty} \xi(f) df = U_{ш}^2,$$

где \bar{A}^2 — средняя величина квадрата огибающей $A(t)$ (также \bar{B}^2 , R^2 и $\bar{U}_{ш}^2$);
 $\xi(f)$ — спектральная интенсивность входного напряжения шума $U_{ш}$, причем $\sqrt{\bar{U}_{ш}^2}$ — эффективное значение напряжения шума.

При одновременном воздействии напряжений сигнала и шума на амплитудный детектор на его выходе будут действовать результирующие однополярные пульсации, постоянная составляющая которых будет зависеть от обеих составляющих входного напряжения. В случае линейного амплитудного детектора, на выходе которого включен осредняющий фильтр, обеспечивающий время заряда, много меньшее времени разряда (как, например, в случае пикового детектирования), наблюдается резкое ухудшение отношения сигнал/шум на выходе детектора, так как постоянная составляющая выходного напряжения определяется тем максимальным значением амплитуды суммарного входного сигнала, которое имеет место на существенно большом отрезке времени. Для предотвращения указанного эффекта необходимо включать осредняющий фильтр в таком месте, где это включение не будет оказывать влияния на работу детектора; зависимость постоянной составляющей на выходе детектора от отношения сигнал/шум для такого случая показана на рис. 1 сплошной линией. Если для оценки флюктуационного поро-

га детекторов применить критерий, используемый Ван-дер-Зилом*, то оказывается, что линейный детектор приблизительно равноценен квадратичному детектору и что значительно лучшие результаты дает фазочувствительный детектор. Эффективное значение флюктуации отклонения индикатора показано на рис. 1 и 2 штриховыми линиями.

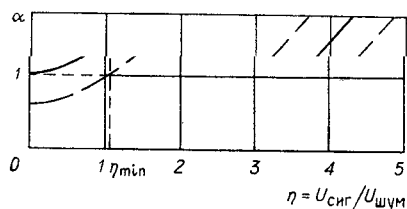


Рис. 1. Зависимость отклонения индикатора нуля с пиковым детектором от соотношения сигнал/шум.

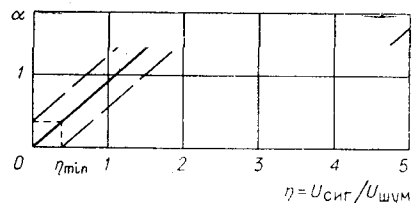


Рис. 2. Зависимость отклонения индикатора нуля с фазочувствительным детектором от соотношения сигнал/шум.

Рассмотрим вкратце отклик фазочувствительного детектора на сигнал с шумом. Если на вход фазочувствительного детектора подать сигнал

$$U_{\text{сиг}} = D \cos(\omega_0 t + \varphi)$$

(здесь D — амплитуда сигнала;

ω_0 — круговая частота сигнала;

φ — сдвиг фаз по отношению к опорному напряжению),

то выходное постоянное напряжение пропорционально составляющей $D \cos \varphi$. Если подать на вход фазочувствительного детектора только напряжение шума, функция которого описывается выражением (1), то выходное напряжение $U_{2\text{ш}}$ будет пропорционально составляющей $A(t)$. Так как вероятность появления $\varphi(t)$ во всех четырех квадрантах одинакова, то появление напряжения обеих полярностей равновероятно и постоянная составляющая этого напряжения равна нулю.

Если подать на вход фазочувствительного детектора одновременно с шумом сигнал с амплитудой D , который находится в фазе с опорным напряжением, то на входе суммарное напряжение (ортогональный вид) будет равно

$$U_1 = [D + A(t)] \cos \omega_0 t + B(t) \sin \omega_0 t.$$

Очевидно, что выходное напряжение детектора пропорционально $D + A(t)$, где D определяет постоянную, а $A(t)$ флюктуационную состав-

* А. Ван-дер-Зил. Флюктуации в радиотехнике и физике. М.—Л., Госэнергоиздат, 1958.

ляющую выходного напряжения. Эти составляющие в функции отношения сигнал/шум графически представлены на рис. 2.

Сравним чувствительности амплитудного и фазочувствительного детекторов. После детектора обыкновенно подключают фильтр, который ограничивает выходной спектр шума детектора. В большинстве случаев в качестве фильтра используется интегрирующая RC -цепочка с постоянной времени $\tau = RC$.

Если использовать для сравнения чувствительности детекторов критерий, используемый Ван-дер-Зилом, то тогда выясним, что величина минимального напряжения, наличие которого можно еще определить (при использовании RC -фильтра), у линейного и квадратичного детекторов пропорциональна корню четвертой степени ширины полосы входного шума:

$$U_{\min} \sim \sqrt[4]{\frac{\xi_0^2 F}{4\tau}} = \sqrt[4]{\frac{\xi_0}{8\tau}} 2 \sqrt[4]{F\tau},$$

где ξ_0 — спектральная интенсивность напряжения шума на входе детектора;

F — ширина спектра шума на входе детектора (с прямоугольным распределением интенсивности и $F \ll \frac{f_0}{5}$).

У фазочувствительного детектора минимальное напряжение, наличие которого можно еще определить, не зависит от ширины полосы и формы спектра входного шума; оно зависит только от интенсивности и ширины выходного шума, на который оказывает влияние постоянная времени выходного фильтра τ :

$$U_{\min} \sim \sqrt{\frac{\xi_0}{8\tau}}.$$

Из этого видно, что фазочувствительный детектор по сравнению с другими детекторами позволяет определять сигналы более низкого уровня приблизительно в отношении

$$2 \sqrt[4]{F\tau}.$$

Если величина произведения $F\tau$ большая (и это почти всегда), то можно представить минимальное напряжение, показываемое фазочувствительным детектором, как

$$U_{\min} \sim \sqrt{\xi_0 \Delta F'},$$

где $\Delta F' = \frac{1}{8\tau}$ — эквивалентная ширина полосы.

Преимущество фазочувствительного детектора перед амплитудными детекторами видно из следующего. Если, например, входная ширина полосы $F = 10$ кГц, а постоянная времени на выходе детектора $\tau = 1$ сек, то фазовым детектором можно определить напряжение, в $2 \sqrt[4]{10 \cdot 1} = 20$ раз меньшее, чем при тех же условиях амплитудным детектором. При $F = 100$ гц и $\tau = 1$ сек фазочувствительный детектор будет в $2 \sqrt[4]{100} = 6,3$ раза более чувствительным, чем амплитудный.

Очевидно, для того, чтобы можно было применить в индикаторе нуля фазочувствительный детектор, необходимо иметь в распоряжении опорное напряжение с соответствующей фазой и частотой, совпадающей с частотой сигнала. Так как сигнал проходит через приемник, где происходит усиление, смешивание и нежелательный сдвиг по фазе, то такие же изменения частоты и фазы необходимо обеспечить и у опорного напряжения. В данном случае требуется высокая стабильность гетеродина, которая достигается путем синхронизации.

Теперь перейдем к описанию комплекта аппаратуры для мостов, предназначенных для использования в диапазоне частот от 30 кГц до 30 МГц.

Генератор. Для питания измерительного моста используется генератор, управляемый кристаллом и работающий по принципу синтеза частот. Основные блоки взяты от нового генератора с одной боковой полосой Тэсла БМ460. Для измерения на двойном Т-образном мосте полного сопротивления достаточно точность $1 \cdot 10^{-4}$ и кратковременная стабильность, приблизительно равная $1 \cdot 10^{-5}/5$ мин. Разработанный генератор обеспечивает точность и стабильность на два порядка выше, чем требуется. Блок-схема комплекта (генератора, моста, индикатора) приведена

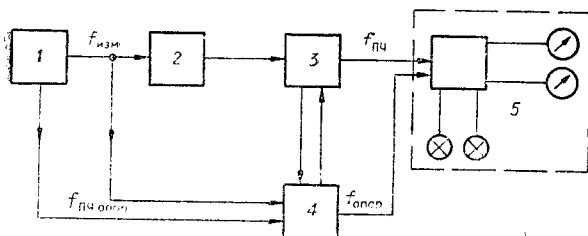


Рис. 3. Блок-схема измерительного комплекта:

1 — генератор; 2 — мост; 3 — усилитель сигнала с синхронизированным гетеродином; 4 — управляющий блок (синхронизация гетеродина, канал опорного сигнала); 5 — блок индикаторов: измерительные детекторы; пиковый и фазочувствительный индикаторы; индикаторы настройки и синхронизации.

на рис. 3. В индикаторе был использован селективный измеритель уровня типа 12ХN020 производства Народного предприятия Тэсла Страшнице, применяемый в целях связи. Прибор был дополнен авторегулировкой чувствительности, контуром для фазовой синхронизации частоты гете-

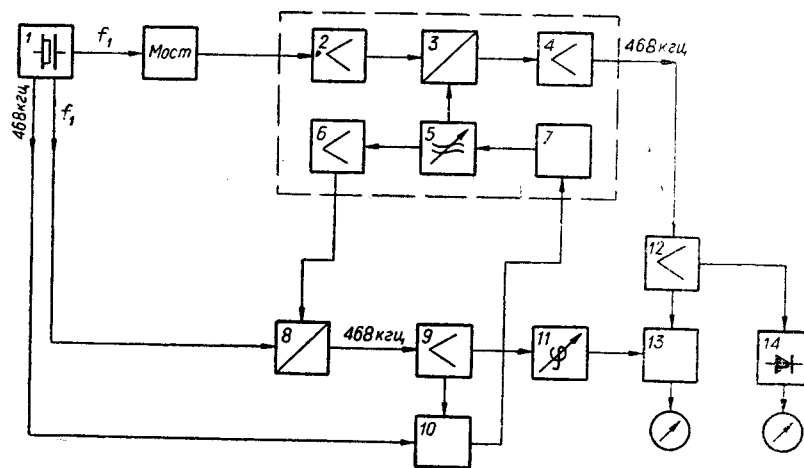


Рис. 4. Блок-схема комплекта для измерения в диапазоне частот от 30 до 300 кГц:

1 — генератор; 2 — настроенный предварительный усилитель; 3 — смеситель; 4 — ПЧ усилитель; 5 — гетеродин; 6 — отделяющий каскад; 7 — реактивная лампа; 8 — смеситель опорного сигнала; 9 — усилитель ПЧ; 10 — вспомогательный фазочувствительный детектор; 11 — фазоизменяющий элемент; 12 — отделяющий каскад; 13 — измерительный фазочувствительный детектор; 14 — пиковый детектор.

родина и отдельным каскадом для выхода сигнала промежуточной частоты. В первоначальную схему приемника внесены некоторые изменения, необходимые прежде всего для понижения шума, повышения стабильности каскадов усиления и для улучшения их фазовых характеристик. Прибор размещен в новом шкафу вместе с новым блоком, в который входят контуры для управления фазовой синхронизацией частоты, измерительные детекторы сигналов (т. е. фазочувствительный и обыкновенный пиковый) и поправочные фазочувствительные элементы для плавного изменения фазы опорного сигнала. К детекторам подключены стрелочные измерительные устройства, одно из которых определяет уровень сигнала без учета фазы, а другое (с нулевым положением стрелки на середине) — только ту составляющую сигнала, которая находится в фазе или противофазе с опорным напряжением. Блок-схема индикатора нуля приведена на рис. 4. Вспомогательные узлы для управления фазовой синхронизацией собраны на транзисторах; для подстройки гетеродина используется реактивная лампа. Для определения правильной синхронизации имеется электронный индикатор настройки ЕМ840.

Индикатор нуля для диапазона частот от 300 кГц до 30 МГц. В качестве основного блока используется приемник К12 производства Народного предприятия Тэсла Пржелуц, предназначенный для целей связи. Приемник работает в диапазоне частот 1,5—30 МГц. Для оставшегося диапазона от 300 кГц до 1,5 МГц подключается преобразователь частоты, при помощи которого можно преобразовать частоту измеряемого сигнала в частоту 1,9 МГц. В этом случае приемник настраивается на частоту 1,9 МГц. Синхронизация осуществляется с помощью эталонной частоты, что позволяет приспособить для наших целей приемник К12. Частота гетеродина подстраивается с помощью реактивной лампы, которая управляется напряжением постоянного тока. Управляющее напряжение поступает от вспомогательного фазочувствительного детектора, на который в качестве опорного подается напряжение от генератора

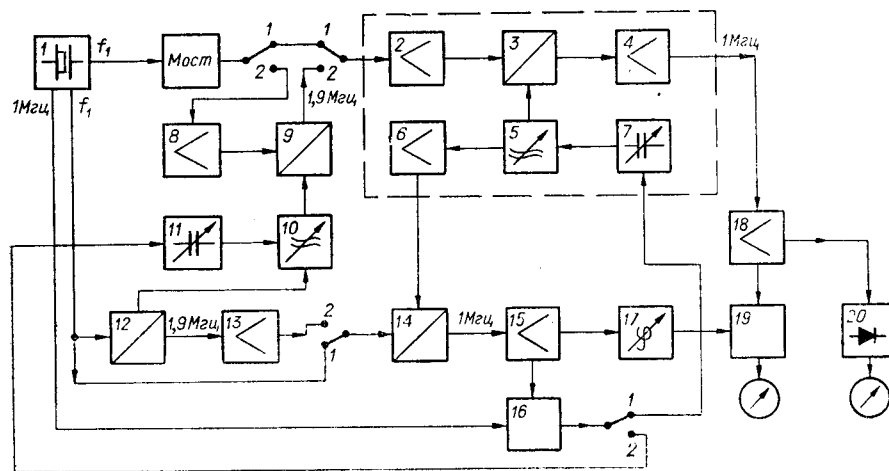


Рис. 5. Блок-схема комплекта для измерения в диапазоне частот от 0,3 до 30 МГц: 1 — генератор; 2 — настроенный предварительный усилитель; 3 — смеситель; 4 — ПЧ усилитель; 5 — гетеродин; 6 — отделяющий каскад; 7 — реактивная лампа; 8 — предварительный усилитель преобразователя; 9 — смеситель; 10 — гетеродин; 11 — реактивная лампа; 12 — вспомогательный смеситель опорного сигнала; 13 — ПЧ усилитель; 14 — смеситель опорного сигнала; 15 — ПЧ усилитель; 16 — вспомогательный фазочувствительный детектор; 17 — фазоизменяющий элемент; 18 — отделяющий каскад; 19 — измерительный фазочувствительный детектор; 20 — пиковый детектор. Положение переключателя: 1) 1,5—30 МГц; 2) 0,3—1,5 МГц.

с частотой 1 Мгц и сигнал ПЧ. Чтобы эффективность синхронизации не зависела от амплитуды сигнала ПЧ, промежуточную частоту для синхронизации получают непосредственно от сигнала, подаваемого на вход измерительного моста. Поэтому генератор снабжен двумя выходами измерительного сигнала. Один предназначен для питания моста, другой — для синхронизации индикатора нуля, для чего используется вспомогательный смеситель, питаемый от общего гетеродина. Выходное напряжение от усилителя промежуточной частоты детектируется так же, как и в рассмотренном выше приборе. Блок-схема индикатора нуля приведена на рис. 5.

*Поступила в редакцию
19 сентября 1966 г.*
