

которые выполнялись с помощью цифрового вольтметра Ш1412 (собственная погрешность вольтметра может достигать 0,05%). При частоте коммутации 2 МГц наблюдалось увеличение погрешности до 0,12% в отдельных точках шкалы.

Фильтрующие емкости в цепях обратной связи операционных усилителей и корректирующие цепи ОУ, показанные на рис. 3, выбраны так, что пульсация на выходе схемы составляет 20 мВ. По-видимому, во многих приложениях столь сильное сглаживание необязательно, поскольку частота пульсаций лежит вне полосы пропускания большинства современных измерительных и управляющих устройств. Среднее за период значение управляющего напряжения практически не зависит от амплитуды пульсаций. Следовательно, в указанных случаях величины емкостей сглаживающих и корректирующих конденсаторов можно снизить, расширив тем самым полосу пропускания устройства.

При сопротивлении регистров и емкостях конденсаторов, приведенных на рис. 3, полоса пропускания по каждому из сомножителей, отсчитываемая по уровню спада частотной характеристики 0,1%, составляет по теоретическим оценкам 1 кГц. Авторы не смогли получить экспериментальных результатов, доказывающих правомерность этой оценки, так как не имели в своем распоряжении измерительных устройств, обеспечивающих столь высокую точность измерений на высоких частотах. Однако с помощью осциллографа до частоты входного сигнала 2 кГц не удалось обнаружить сколько-нибудь заметных искажений амплитуды и формы выходного сигнала.

Таким образом, описанное в статье МДУ, обладая схемной простотой, отличается таким сочетанием высокой точности и быстродействия, которое ранее не достигалось. Уменьшение номиналов используемых резисторов и конденсаторов по сравнению с известными схемами значительно упрощает решение проблемы интегральной реализации устройства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. Корн, Т. Корн. Электронные аналоговые и аналого-цифровые вычислительные машины. М., «Мир», 1967.
2. Е. П. Угрюмов. Анализ точности транзисторного импульсного делителя напряжения.— «Измерительная техника», 1967, № 4.
3. D. Jackei. Ein Spannung — Frequenz — Umseltzer hoher Genauigkeit.— «Elektronik», 1972, № 3.
4. Уайленд. Оптимизация характеристик дифференциального усилителя путем каскадного включения полевых транзисторов.— «Электроника», 1971, № 2.

*Поступила в редакцию 21 сентября 1974 г.;
окончательный вариант — 9 декабря 1974 г.*

УДК 621.317.733

С. М. КАЗАКОВ, К. М. СОБОЛЕВСКИЙ, В. Н. СУМИТЕЛЬНОВ
(Новосибирск)

МОДУЛЬНЫЕ УКАЗАТЕЛИ РАЗНОВРЕМЕННОГО СРАВНЕНИЯ С УГЛУБЛЕНИЕМ МОДУЛЯЦИИ*

При автоматизации измерения комплексных проводимостей в физико-химическом эксперименте (например, в электрохимическом [1—3]) возникает необходимость обеспечить (с помощью соответ-

* Материал должен на II Республиканской научно-технической конференции «Электронные измерительные приборы и системы с коммутационно-модуляционными преобразователями» (Львов, 1971).

вующего модульного указателя [4]) высокую точность разновременного сравнения двух гармонических сигналов A_i и A_j по их модулям (A_i и A_j) в широком динамическом диапазоне. Достижение высокой точности требуемого сравнения сигналов при использовании обычных модульных указателей разновременного сравнения [5, 6], как известно, ограничивается узким диапазоном значений A_i и A_j достаточно низкого уровня [5]. С расширением диапазона A_i и A_j в сторону значений большего уровня точность сравнения уменьшается из-за уменьшающейся величины глубины модуляции $m = \frac{A_j - A_i}{A_j + A_i}$, и в этом случае для повышения

разрешающей способности модульного указателя требуется предварительно ограничить входные сигналы «снизу» [7], обеспечив таким путем повышение коэффициента глубины модуляции (углубление модуляции). Однако применение известных углубителей модуляции [7] в модульном указателе не дало существенного эффекта, поскольку в них (в силу принципа действия) повышение коэффициента модуляции ведет к снижению динамических характеристик всего указателя, и наоборот. Поэтому возникла необходимость изыскания иных, более эффективных принципов построения модульных указателей с углублением модуляции. В данной статье изложены результаты проведенных исследований.

Сущность работы известных углубителей модуляции состоит в том, что некоторым путем формируется постоянноточковая величина A_0 , которая с помощью одно- или двухполупериодного детектора вычитается в течение периода коммутации из модулей обоих входных сигналов [7] (рис. 1); при этом в первом полупериоде коммутации на выходе вычитающего устройства будут усеченные «снизу» полуволны с амплитудой $A' = A_i - A_0$, а во втором — с амплитудой $A'' = A_j - A_0$, и коэффициент глубины модуляции m^* выходного сигнала углубителя будет определяться выражением

$$m^* = \frac{A'' - A'}{A'' + A'} = \frac{A_j - A_i}{A_j + A_i - 2A_0} = m \frac{1}{1 - \frac{A_0}{A_i}(1-m)} = m\kappa. \quad (1)$$

Величина κ , количественно характеризующая величину углубления модуляции, может быть названа коэффициентом углубления модуляции.

Поскольку разрешающая способность указателей разновременного сравнения, согласно [5], прямо пропорциональна тому минимальному значению глубины их модуляции $m = m_0$, которое еще способно различать выходное устройство, то из (1) легко видеть, что разрешающая способность указателя с углублением модуляции увеличивается в κ раз по сравнению с разрешающей способностью указателя с той же чувствительностью, но без углубления модуляции. Значение κ в формуле (1) при $m \rightarrow 0$ целиком определяется отношением A_0 и A_i . Отсюда очевидно, что основным при построении требуемых указателей с углублением модуляции является определение путей формирования величины A_0 , максимально близкой к A_i ,

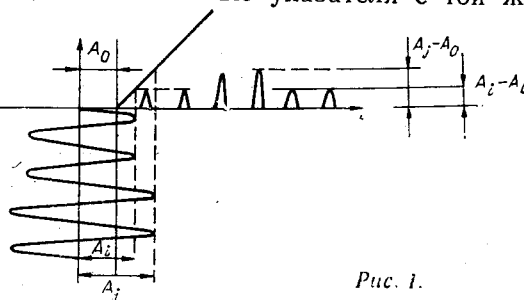


Рис. 1.

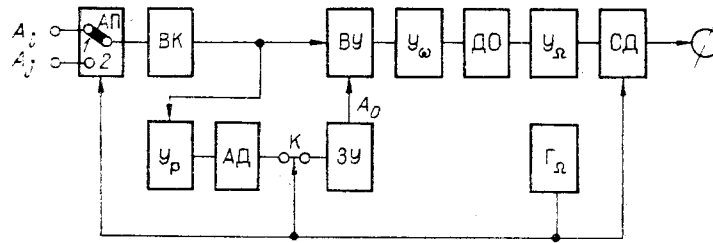


Рис. 2.

без снижения эксплуатационных характеристик указателей разновременного сравнения.

В основе рассматриваемых ниже структур лежит формирование в один из полупериодов коммутации величины A_0 , пропорциональной модулю одного из входных сигналов (A_i), запоминание постояннотокowego сигнала A_0 вне усилительно-преобразовательного тракта указателя и вычитание A_0 в оба полупериода коммутации из модулей обоих входных сигналов.

Структура указателя, прямо реализующая сформулированный выше принцип, представлена на рис. 2. Здесь, в дополнение к известным структурам указателей разновременного сравнения, содержащим автоматический переключатель (АП), входной каскад (ВК), усилитель несущей (U_ω), детектор огибающей (ДО), усилитель коммутационной частоты (U_Ω), синхронный детектор (СД), генератор коммутационной частоты (Γ_Ω), добавлены усилитель с регулируемым коэффициентом усиления (U_p), амплитудный детектор (АД), ключ (К), работающий синхронно с АП, запоминающее устройство (ЗУ) и вычитающее устройство (ВУ). Работа указателя состоит в следующем. В первом полупериоде коммутации автоматический переключатель АП находится в положении 1 и ключ К замкнут. После установления переходных процессов в цепи АД—ЗУ на выходе ЗУ устанавливается $A_0 = K_d A_i$, где K_d — коэффициент передачи канала U_p —АД—ЗУ, а с выхода ВУ снимаются усеченные полуволны с амплитудой $A' = A_i(1 - K_d)$. Во втором полупериоде коммутации АП переходит в положение 2, ключ К размыкается, на выходе ЗУ сохраняется величина $K_d A_i$, а амплитуда полуволи на выходе вычитающего устройства становится равной $A'' = A_j - K_d A_i$. Полагая, что переходный процесс в первом полупериоде коммутации кратковременен (АД может быть реализован на быстродействующих амплитудных детекторах со временем установления переходного процесса в 1—2 периода несущей [8]) по сравнению с длительностью полупериода коммутации и существенно не влияет на работу указателя, определим значение глубины модуляции m^* сигнала на выходе ВУ:

$$m^* = m \frac{1}{1 - K_d(1 - m)}. \quad (2)$$

Из формулы (2) видно, что при $K_d \rightarrow 1$ на выходе ВУ достигалась бы 100%-ная модуляция с амплитудой, пропорциональной разности $A_j - A_i$. Однако в реальном устройстве по схеме рис. 2 реализовать такую предельную возможность нельзя из-за повышенных требований, предъявляемых в данном случае к стабильности, линейности

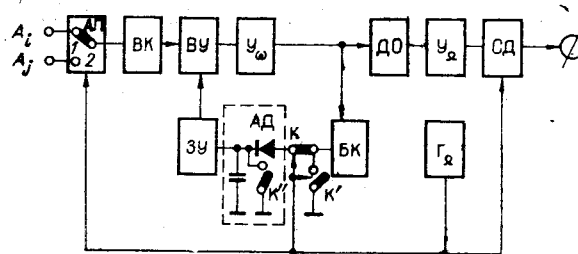


Рис. 3.

и согласованности характеристик вычитающего устройства и канала формирования A_0 .

Исключить влияние указанных факторов на повышение коэффициента углубления модуляции можно в устройстве, схема которого приведена на рис. 3. В этом устройстве в первом полупериоде коммутации (когда АП находится в положении 1, а ключ К замкнут) образуется петля отрицательной обратной связи (ООС) по постоянному току. Выполнив буферный каскад (БК) с высоким выходным сопротивлением (генератор тока), получим указатель с астатическим способом формирования опорного сигнала A_0 . При замкнутой петле ООС амплитуда сигнала на выходе усилителя U_0 будет равна $A' = \Delta K_p$, где Δ — напряжение на выходе ВУ (которое не зависит от модуля входного сигнала, а определяется только неидеальностью интегратора и порогами нечувствительности нелинейных элементов вычитающего устройства), K_p — коэффициент передачи разомкнутой петли ООС. Величина A_0 при этом определится по формуле $A_0 = A_i - \Delta$. Во втором полупериоде коммутации (АП переходит в положение 2, ключ К размыкается, ключ К' замыкает цепь генератора тока) амплитуда усеченных полуволн на выходе U_0 будет определяться выражением $A'' = (A_j - A_i + \Delta) K_p$. Подставляя полученные для рассматриваемой схемы значения A' и A'' в формулу (1), находим

$$m^* = m \frac{1}{1 - \left(1 - \frac{\Delta}{A_i}\right)(1 - m)}$$

В обоих рассмотренных выше устройствах при $x \rightarrow \frac{1}{m}$ возникает необходимость ориентации указателей относительно меньшего из входных сигналов. Последнее либо ограничивает область применения таких указателей цепями уравнивания, в которых x измерительному состоянию подходят только с одной стороны (например, при развертывающем уравнивании), либо требует усложнения указателя введением специального устройства, осуществляющего ориентацию указателя относительно меньшего сигнала (например, синхронизирующего работу ключа К с замыканием АП не в положение 1, а в положение 2; ключ К' на рис. 3 в этом случае используется для автоматического разряда запоминающего конденсатора).

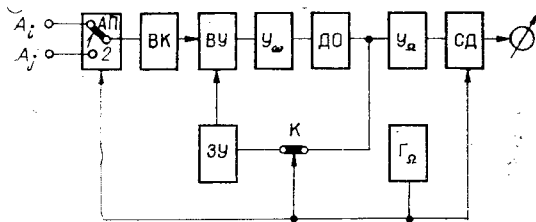


Рис. 4.

С учетом сделанных замечаний более перспективным оказывается использование в указателе статического способа формирования опорного сигнала A_0 . Блок-схема такого указателя приведена на рис. 4. В этом устройстве в первом полупериоде коммутации при

замкнутой петле ООС величина постоянной составляющей на выходе детектора огибающей ДО* равна

$$A' = A_i \frac{K_p}{1 + K_p K_{OC}}, \quad (3)$$

где K_{OC} — коэффициент передачи цепи ООС. Согласно (3) для работы усилителя U_0 при замкнутой петле ООС в линейной зоне даже при большом коэффициенте усиления достаточно, чтобы динамический диапазон входных сигналов был меньше динамического диапазона уси-

* Под ДО мы понимаем амплитудный детектор с фильтром низкой частоты на выходе.

теля. Во втором полупериоде коммутации, когда ключ К размыкается, а запомненная в ЗУ величина $A_0 = A'K_{OC}$ вычитается из модуля второго входного сигнала, постоянная составляющая на выходе ДО определится из выражения

$$A'' = (A_j - A_0) K_p = \left(A_j - A_i \frac{K_p K}{1 + K_p K_{OC}} \right) K_p. \quad (4)$$

Следовательно, вблизи равновесия ($A_i \cong A_j$) усилитель Y_0 всегда работает в линейной зоне, а выделяемая детектором амплитуда огибающей коммутационной частоты $A_\Omega = \frac{A'' - A'}{2}$ равна $A_\Omega = \frac{1}{2} K_p (A_j - A_i)$. При $A_j \gg A_i$ максимальный положительный скачок напряжения на выходе ДО определяется разностью A' и верхнего предела динамического диапазона усилителя. При $A_j \ll A_i$ максимальный отрицательный скачок напряжения на выходе ДО в силу односторонней проводимости ВУ составляет A' .

В соответствии с (1), (3) и (4) значение коэффициента модуляции для рассматриваемого указателя вблизи равновесия выражается формулой

$$m^* = m \frac{1}{1 - \frac{K_p K_{OC}}{1 + K_p K_{OC}} (1 - m)} = m \frac{1 + K_p K_{OC}}{1 + m K_p K_{OC}}. \quad (5)$$

Из формулы (5) видно, что при $K_{OC} \cong 1$ коэффициент углубления модуляции будет тем больше, чем больше K_p . В указателях с низким быстродействием (с большой постоянной времени фильтра ДО) значение коэффициента K_p может быть выбрано достаточно большим без потери устойчивости устройства. При стремлении же повысить быстродействие указателя условие устойчивости накладывает на выбор K_p определенные ограничения, что приводит к снижению коэффициента углубления модуляции.

В тех случаях, когда выбор величины K_p ограничен, достичь повышения коэффициента углубления модуляции можно сочетанием принципов работы углубителя модуляции по схеме рис. 2, 4; при этом требования, предъявляемые к каждому из углубителей, могут быть существенно снижены. В таком комбинированном устройстве в первом полупериоде коммутации, когда ключи К замкнуты, напряжение на выходе ДО определится выражением

$$A' = A_i (1 - K_d) \frac{K_p}{1 + K_p K_{OC}}. \quad (6)$$

Во втором полупериоде коммутации, когда ключи К разомкнуты, напряжение на выходе ДО определится выражением

$$A'' = \left[(A_j - K_d A_i) - A_i (1 - K_d) \frac{K_p K_{OC}}{1 + K_p K_{OC}} \right] K_p = A_j - A_i \frac{K_d + K_p K_{OC}}{1 + K_p K_{OC}}. \quad (7)$$

Согласно формулам (6) и (7), коэффициент глубины модуляции на выходе ДО будет равен

$$m^* = m \frac{1 + K_p K_{OC}}{1 + m K_p K_{OC} - K_d (1 - m)}.$$

Так, например, при условии, что $m \rightarrow 0$, $K_p = 100$, $K_{OC} = 0,8$, $K_d = 0,5$, значение коэффициента углубления модуляции m^* в указателе с комбинированным способом углубления составляет 162.

Специфичными узлами всех рассмотренных выше указателей с углублением модуляции (в сопоставлении с известными указателями раз-

новременного сравнения) являются вычитающее и запоминающее устройства. В указателе, предназначенном для низких частот, вычитающее устройство достаточно просто реализуется на основе усиленного каскада, работающего в режиме «В» с управляемым от ЗУ напряжением или током смещения рабочей точки (см., например, [9]). В указателе, предназначенном для работы на высоких частотах (сотни килогерц), предпочтительнее вычитающее устройство на диодах. Одна из возможных схем вычитающего диодного устройства приведена на рис. 5. Принцип работы диодного ВУ состоит в следующем. Входной сигнал поступает в вычитающее устройство через резистор R_1 . В исходном состоянии, когда коллекторный ток триода равен нулю, положительная полуволна входного сигнала через диод D_2 полностью проходит на нагрузку R_n , а отрицательная полуволна шунтируется диодом D_1 . По мере возрастания положительного напряжения на базе триода ПТ возрастает и коллекторный ток, который управляет смещением рабочей точки диода D_1 : диод D_1 приоткрывается и шунтирует часть положительной полуволны входного сигнала; чем больше открывается диод D_1 , тем меньшая часть положительной полуволны поступит на нагрузку. Запоминающее устройство достаточно просто реализуется на основе истокового повторителя с динамической нагрузкой; погрешность хранения такого ЗУ не хуже 1% в минуту.

На основе проведенных исследований был разработан указатель по схеме рис. 3 [10]. Указатель предназначен для сравнения переменных напряжений на уровне одного вольта на частотах 100—200 кГц. При сравнительно простой принципиальной схеме и частоте коммутации 5 Гц погрешность указателя не превышала 0,05%.

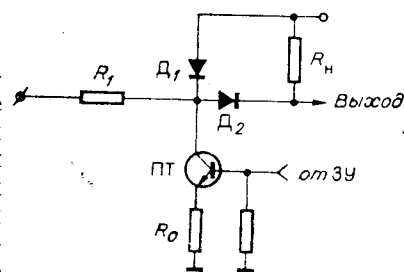


Рис. 5.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. П. Новицкий. Некоторые принципы построения устройств для измерения параметров электродных процессов на переменном токе. Автореф. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. М., 1974. (Ин-т электрохимии АН СССР.)
2. К. М. Соболевский, С. М. Казаков, С. П. Новицкий, В. А. Мезенцев, Р. Ю. Бек. Полуавтоматический измеритель параметров импеданса, характеризующего электродный процесс.— В кн. Измерение комплексных проводимостей в физико-химическом эксперименте. Новосибирск, Изд. ИАЭ СО АН СССР, 1972.
3. С. М. Казаков, С. П. Новицкий, К. М. Соболевский. Раздельное измерение параметров нерезонансных трехэлементных двухполюсников.— «Автометрия», 1969, № 6.
4. С. М. Казаков, К. М. Соболевский, В. Н. Сумительнов. Указатели измерительных состояний цепей уравнивания.— «Автометрия», 1968, № 6.
5. Л. Я. Мизюк. Електронні показчики змінної напруги. Київ, Держтехвидав УРСР, 1960.
6. Ю. А. Скрипник. Способы построения высокостабильных фазочувствительных дифференциальных индикаторов.— «Приборостроение», 1961, № 10.
7. Ф. Б. Гриневич, А. В. Чеботарев, А. И. Новик. Элементы и схемы цифровых экстремальных мостов переменного тока. Фрунзе, Изд-во АН КиргССР, 1963.
8. М. А. Сурду. Экстремум-детекторы автоматических мостов переменного тока. Автореф. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. Киев, 1970. (Ин-т электродинамики АН УССР).
9. К. А. Нетребенко. Компенсационные схемы амплитудных вольтметров и указателей экстремума. М., «Энергия», 1967.
10. В. Н. Сумительнов. Модульный указатель с углублением модуляции.— В кн.: Измерение комплексных проводимостей в физико-химическом эксперименте. Новосибирск, Изд. ИАЭ СО АН СССР, 1972.

Поступила в редакцию 11 ноября 1974 г.