

УДК 621.317

Д. т. н. Г. А. ОБОРСКИЙ, к. т. н. В. И. КОВАЛЬКОВ,
д. т. н. В. Н. ТИХЕНКО, к. т. н. П. Т. СЛОБОДЯНИК

Украина, Одесский национальный политехнический университет
E-mail: bulkob@km.ru

СВЕТОДИОДНЫЕ ПОКАЗЫВАЮЩИЕ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА НА МНОГОПороГОВЫХ КОМПАРАТОРАХ

Рассмотрены принципы построения показывающих электроизмерительных устройств с оптическими шкалами, управляемыми непосредственно многопороговыми компараторами напряжения либо тока. Предложенные измерительные устройства со светодиодными индикаторами, обладающие улучшенной разрешающей способностью, могут стать альтернативой серийно выпускаемым за рубежом экспериментальным пробникам.

Ключевые слова: компараторы, показывающие приборы, светодиодные шкалы.

Показывающие электроизмерительные приборы с оптическими шкалами, благодаря их большей, чем у цифровых приборов, информативности, надежности, нечувствительности к ударным нагрузкам и вибрациям, а также высокой технологичности изготовления и низкой стоимости, во многих случаях с успехом заменяют стрелочные приборы [1]. Промышленные образцы таких приборов [2, 3] выполняют по традиционной схеме с кодо-дискретным преобразованием информации (рис. 1, а). Такие измерительные устройства имеют невысокую точность из-за низкой разрешающей способности. Она может быть повышена лишь путем увеличения разрядности аналого-цифровых преобразователей (АЦП). Однако дешифраторы (ДШ) двоичного кода в единичный, которым управляется линейно-дискретная шкала (ЛДШ) прибора, значительно усложняют ее конструкцию. Нормированный уровень входного напряжения АЦП обеспечивает преобразователь измеряемой величины X в напряжение U_X (ПХУ). Приборы, имеющие такую структуру, пока еще уступают по своей разрешающей способности стрелочным.

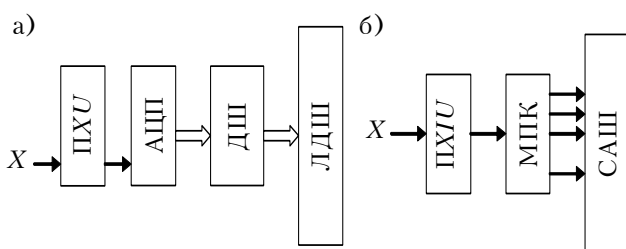


Рис. 1. Обобщенные структурные схемы измерительных приборов с оптической шкалой с кодо-дискретным (а) и дискретно-аналоговым (б) преобразованием информационного сигнала

В показывающих электроизмерительных приборах, в которых управление индикаторами светодиодной аналоговой шкалы (САШ) осуществляется непосредственно сравнивающими ячейками многопорогового компаратора (МПК), необходимость в дешифраторах отпадает. На рис. 1, б (где ПХУ — преобразователь величины X в напряжение или ток) показана схема прибора с такой структурой. Его разрешающая способность определяется числом ячеек сравнения МПК. Из-за невысокой точности, необходимости в подстройках и нетехнологичности изготовления такие приборы находят лишь ограниченное применение, в основном в различных пробниках или индикаторах [3, 4].

В настоящей работе ставится задача по проектированию многопороговых и многоустойчивых устройств сравнения напряжений и токов, ориентированных на промышленно пригодную недорогую технологию изготовления, а также по созданию на их базе показывающих измерительных приборов повышенной точности с оптическими шкалами. К разрабатываемым МПК предъявляется целый ряд требований, основные из которых следующие:

- ячейки сравнения компараторов должны содержать минимально возможное количество элементов;
- должна быть исключена неоднозначность выходного единичного кода в точках переключения МПК;
- необходимо использовать только технологичные в микросхемотехнике компоненты;
- МПК должны легко согласовываться с экономичными жидкокристаллическими индикаторами либо со светоизлучающими диодами с высокой яркостью свечения.

Электроизмерительные приборы с унитарным единичным кодом

Известные измерительные устройства с управляющим унитарным единичным кодом обычно выполняются на основе отдельных сравнивающих операционных усилителей либо интегральных компараторов напряжения [4]. Такие приборы и сегодня остаются сравнительно сложными и дорогостоящими, поскольку требуют обеспечения дополнительных мер по согласованию их выходов с индикаторами и по устранению неоднозначности показаний приборов при критических значениях входного напряжения в точках срабатывания сравнивающих ячеек. Разрешающая способность таких приборов существенно ограничивается потребляемой отсчетным устройством мощностью, особенно заметной при использовании светодиодных оптических шкал. Срабатывающие индикаторные элементы шкалы непосредственно отражают состояния сравнивающих ячеек МПК, число которых определяется уровнем входного тока I_X либо напряжения U_X измерительного преобразователя ПХИУ. Потребляемая шкалой мощность зависит от уровня входного сигнала и достигает максимума при предельных значениях уровня сигнала.

Разработанным нами многопороговым компаратором напряжения с унитарным единичным кодом, так же как и измерительным устройствам на автономных компараторах напряжения с разными порогами срабатывания, присуще повышенное энергопотребление. Однако они обеспечивают более высокую надежность считывания и наглядность показаний прибора (в виде столбца или сектора). Здесь целесообразно использовать слаботочные жидкокристаллические оптические шкалы. На рис. 2 для примера представлена схема МПК с унитарным выходным кодом для экономичного измерителя тока. Применение в многопороговом КМОП-компараторе тока полевых транзисторов значительно упрощает схемотехнику и облегчает его исполнение в виде отдельной интегральной микросхемы.

Сравнивающими элементами в КМОП-компараторе тока служат n -канальные МОП-тран-

зисторы 1-1, 1-2, ..., 1- N , стоки которых являются выходами многопорогового устройства. Приоритетные связи в нем создаются последовательно включенными p -канальными МОП-транзисторами с изолированным затвором 2-1, 2-2, ..., 2-($N-1$). Выходной ток $I_{оп}$ генератора 4 размножается с помощью токовых зеркал на транзисторе смещения 3 и идентичных транзисторах 1-1, 1-2, ..., 1- N , образующих N генераторов равных опорных токов $I_{оп} = I_{оп1} = I_{оп2} = \dots = I_{опN}$.

Измеряемый ток I_X , отражаясь с помощью токового зеркала 6, протекает к точке соединения стока транзистора 1-1 и истока транзистора 2-1. При $I_X = 0$ все n -канальные МОП-транзисторы оказываются в режиме насыщения, и на выходах устройства устанавливаются низкие, т. е. «нулевые», потенциалы. Все p -канальные МОП-транзисторы заперты, поскольку их пороговые напряжения отпирания «затвор — исток» $U_{зи}$ значительно превышают напряжения «сток — исток» $U_{си}$ насыщенных n -канальных МОП-транзисторов.

Через «сток — исток» транзистора 1-1 протекает нарастающий ток I_X . До тех пор, пока $I_X < I_{оп1}$, транзистор 1-1 остается в насыщенном состоянии и на выходах компаратора сохраняются нули. Транзистор 1-1 выходит из насыщения и переходит в активную область работы, когда входной ток достигает значения $I_{оп}$: $I_X = I_{оп1} = I_{оп}$. Это приводит к резкому нарастанию напряжения «исток — сток» транзистора 1-1 до напряжения отпирания «затвор — исток» транзистора 2-1. На первом выходе МПК устанавливается высокий потенциал, соответствующий логической единице «1».

При дальнейшем нарастании I_X разностный ток $I_X - I_{оп}$ протекает через «исток — сток» транзистора 2-1 и «сток — исток» следующего опорного транзистора 1-2. Когда I_X достигает значения $I_{оп1} + I_{оп2} \geq 2I_{оп}$, на втором выходе компаратора также устанавливается высокий потенциал «1», т. к. транзистор 1-2 выходит из режима насыщения и отпирает транзистор 2-2. При дальнейшем нарастании измеряемого тока I_X ана-

логичным образом происходит отпирание последующих p -канальных МОП-транзисторов и переход в активный режим работы опорных n -канальных МОП-транзисторов. Таким образом ток I_X в КМОП-компараторе преобразуется в единичный унитарный код. Выходные формирователи МПК выполняются на комплементарных парах МОП-транзисторов. Благодаря тому, что в этом устройстве используются одинаковые n -канальные МОП-транзис-

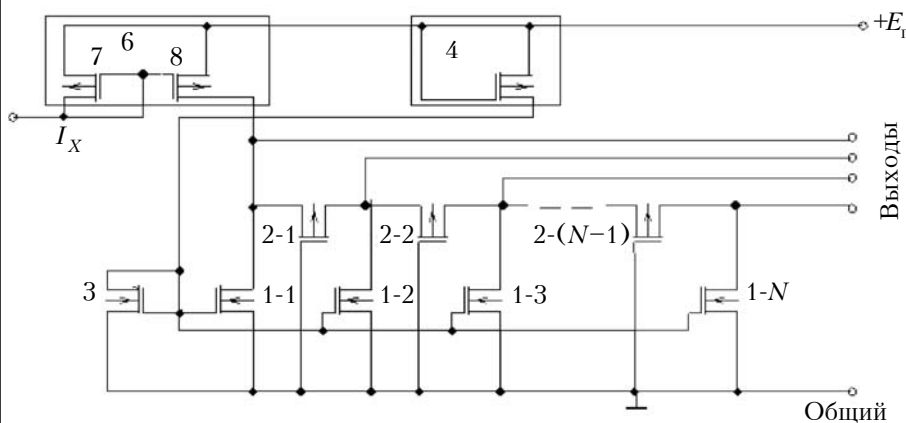


Рис. 2. Многопороговый компаратор тока на КМОП-транзисторах

торы с равными мощностями рассеивания, достигается высокая идентичность их параметров, а следовательно и высокая точность установки опорных токов. Это позволяет выполнять токовый МПК с большим числом порогов. За счет уменьшения опорных токов можно повысить чувствительность компаратора, определяемую минимальными значениями токов $I_{оп1} = I_{оп2} = \dots = I_{оп N}$.

Приборы с оптической шкалой на базе рассмотренных многопороговых компараторов, как и множество других известных измерительных устройств подобного типа на автономных компараторах либо на пороговых схемах, имеют существенный недостаток — большую погрешность квантования $\delta_{\text{кв}}$. Она определяется числом N сравнивающих ячеек компаратора и составляет

$$\delta_{\text{KR}} = 100/N. \quad (1)$$

Так, например, для однодекадного оптического измерителя с десятью индикаторными светодиодами погрешность квантования $\delta_{\text{кв}}$ составит 10%. Чтобы уменьшить $\delta_{\text{кв}}$ до приемлемой для большинства случаев приведенной погрешности, хотя бы до 2,5%, потребуется уже 40 сравнивающих ячеек. Выполнить такой МПК, конечно же, весьма затруднительно.

Электроизмерительные приборы с позиционным единичным кодом

На выходах многоустойчивых компараторов (**МУК**) на сравнивающих дифференциальных каскадах за счет введения межкаскадных приоритетных связей можно получить позиционный единичный код, а также устранить неоднозначность показаний прибора при критических значениях входного напряжения [5, 6]. Такие устройства в значительно большей степени удовлетворяют перечисленным выше требованиям к МПК, но и они нашли лишь ограниченное применение, в основном из-за того, что используемые в межкаскадных связях конденсаторы нетехнологичны для микросхем, а формирующие тун-

нельные диоды к тому же имеют довольно большой разброс параметров. В следящем МУК на параллельно включенных дифференциальных каскадах 1-1, 1-2, ..., 1- N , функциональная схема которого приведена на **рис. 3**, эти недостатки отсутствуют.

Каскады сравнивающих ячеек компаратора выполнены на транзисторных $n-p-n$ -структурах 2, 3. Приоритетные связи в нем обеспечиваются дополнительными каскадами на комплементарных транзисторах 7, 8 и резисторах 9, 10, 11. Все каскады имеют одинаковые генераторы 5 тока I_g на элементах 6 и 12. Источник опорных напряжений на параметрических стабилизаторах вырабатывает напряжение смещения E_{c1} для генераторов тока и E_{c2} в качестве опорного напряжения для выходных ключей 7. Напряжения на входах 4 ячеек сравнения задают пороги срабатывания МУК и характер оптической шкалы показывающего вольтметра: линейный, кусочно-линейный или нелинейный.

Межкаскадные связи между соседними сравнивающими ячейками используются для блокировки «младших» ячеек при срабатывании «старших», что вызывает скачкообразное переключение сравнивающих каскадов и устраняет неоднозначность выходного кода МУК. Таким образом обеспечивается приоритетность в срабатывании дифференциальных каскадов компаратора, что позволяет непосредственно получать на его выходах не унитарный, а позиционный единичный код. Показания прибора представляются на его оптической шкале в виде перемещающейся метки — аналога светового указателя электроизмерительного прибора. Потребляемая же такой шкалой мощность минимальна и определяется потреблением лишь одного индикаторного элемента сработавшего каскада.

Принцип работы следящего многоустойчивого компаратора иллюстрируют временные диаграммы на **рис. 4**, на которых видны изменения коллекторных напряжений U_{κ} ячеек сравнения и

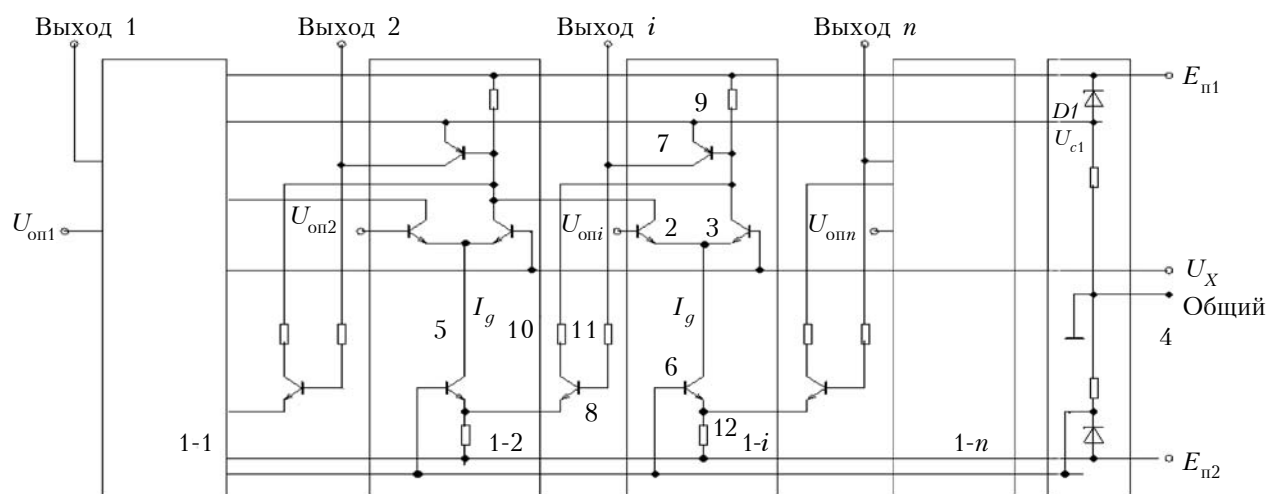


Рис. 3. Следящий многоустойчивый компаратор напряжения на сравнивающих параллельно включенных дифференциальных каскадах

напряжений $U_{\text{вых}}$ на разных выходах МУК. Показано, что при любом значении напряжения U_X обеспечивается срабатывание только лишь одной ячейки сравнения компаратора. Если напряжение U_X изменять скачком, то срабатывает тот i -й каскад, для которого $U_{ri} \leq U_X \leq U_{i+1}$. Только для него выполняется условие включения выходного транзисторного ключа: $U_{ki} > E_{\text{см}1}$, и только на i -м выходе компаратора появляется «1». МУК непрерывно отслеживает входное напряжение U_X : при его произвольном изменении «1» появляется только на том выходе компаратора, для которого преобразуемое напряжение U_X в данный момент превышает соответствующее ему опорное напряжение, но остается меньше соседнего большего опорного напряжения.

Благодаря стабильности и точности опорных напряжений такой МУК может выполнять функции параллельного АЦП, если дополнить его шифратором единичного кода в двоичный. При одинаковых значениях квантов соседних пороговых напряжений функция преобразования АЦП будет линейной, а при различающихся квантах — нелинейной. Чтобы реализовать показывающий измерительный прибор с произвольной градуировочной характеристикой, достаточно к выходам такого МУК подключить индикаторные элементы. Достоинством данного компаратора является также то, что в оптической шкале могут быть использованы индикаторные элементы различного типа, в том числе и цифровые знакогенерирующие газоразрядные индикаторы. Однако с ростом разрешающей способности, т. е. с увеличением количества индикаторных элементов оптической шкалы, размеры метки будут уменьшаться, а показания прибора могут стать недостоверными.

Измерители тока с дискретно-аналоговой светодиодной шкалой

Новые возможности появляются при использовании многопороговых компараторов с дискретно-аналоговым выходом [5, 6]. В них отсутствует скачкообразное переключение сравнивающих ячеек, но благодаря межкаскадным приоритетным связям обеспечивается поочередное подключение опорных генераторов тока, уравновешивающих измеряемый ток. На рис. 5 показана схема подобного устройства со светодиодной оптической шкалой.

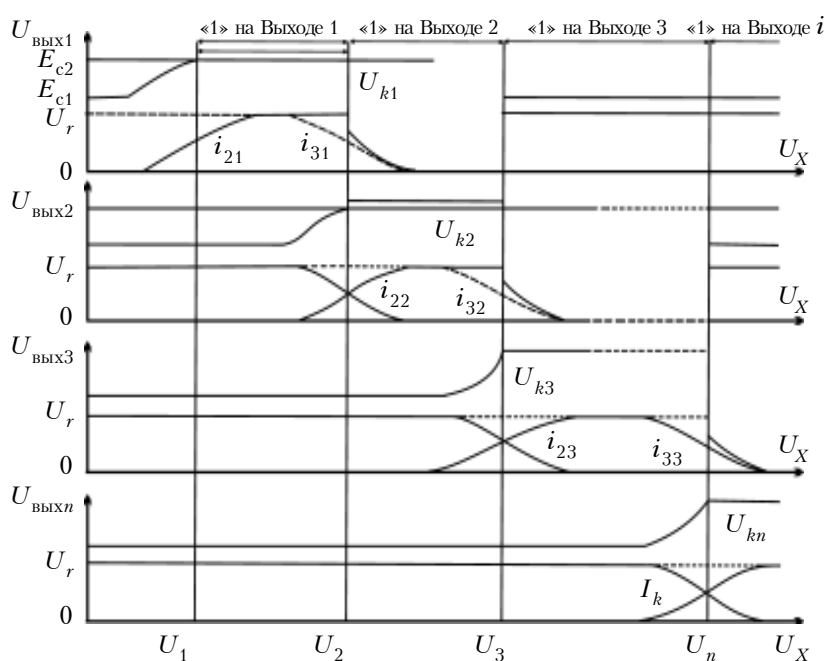


Рис. 4. Временные диаграммы работы следящего МУК

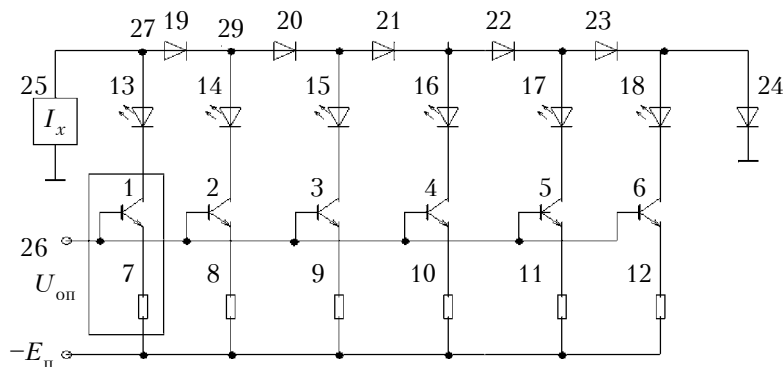


Рис. 5. Схема токоизмерительного устройства с оптической шкалой на светодиодах

Опорные генераторы тока выполнены на транзисторах 1–6, которые служат одновременно элементами, сравнивающими измеряемый ток I_X источника сигнала 25 с пороговыми значениями токов $I_{\text{оп}1}, I_{\text{оп}2}, \dots, I_{\text{оп}6}$ генераторов. Эти значения устанавливаются автономно опорным напряжением на входе 26 и сопротивлениями резисторов 7–12. В зависимости от их соотношений шкала прибора может быть линейной или нелинейной. Приоритет в срабатывании ячеек устанавливается диодами 19–24. В этом устройстве сравниваются токи, а не напряжения, и количество элементов МПК значительно сокращается.

Устройство работает следующим образом. Если измеряемый ток $I_X = 0$, то через светоизлучающие диоды 13–18 ток не протекает и транзисторы 1–6 находятся в насыщенном состоянии. При увеличении тока I_X через коллектор транзистора 1 начинает протекать ток, вызывающий свечение светоизлучающего диода 13. До тех пор, пока I_X будет меньше тока насыщения

I_{T1} транзистора 1, все транзисторы остаются в насыщенном состоянии, а диоды — запертыми. Когда I_X превысит опорное значение I_{T1} , транзистор 1 выйдет из насыщения и потенциал точки 27 резко возрастет, что приведет к отпираанию диода 19. Выходной ток транзистора 1 не может превышать значение тока I_{T1} первого опорного генератора, поэтому весь избыточный ток I потечет через светоизлучающий диод 14:

$$I_X - I_{T1} \leq I \leq I_{T2} \quad (2)$$

Дальнейшее увеличение тока I_x вызовет последовательное отпирание диодов 20–24 и загорание светоизлучающих диодов 14–18. При этом ток через последний светящийся светодиод может меняться в пределах кванта, т. е. от нуля до тока опорного генератора $I_{оп}$.

Поскольку яркость свечения светодиодов пропорциональна протекающим через них токам, то можно приближенно, с погрешностью 25–35%, оценивать величину остаточного тока последнего горящего светодиода шкалы. Это позволяет проводить измерения однодекадным прибором с приведенной погрешностью уже не 10%, а всего лишь 2,5–3,5%, т. е. с погрешностью, характерной для многих стрелочных приборов.

В схемотехническом отношении более совершенным является многопороговое устройство для измерения тока на многоколлекторном транзисторе (**рис. 6**). Это устройство ориентировано на интегральное исполнение, поэтому в нем вместо приоритетных диодов используются транзисторные структуры. Интегральный многоколлекторный транзистор 4 генерирует одинаковые опорные токи, значение которых устанавливается резистором 5 и источником напряжения смещения на транзисторе 7. Эти токи замыкаются через переходы транзисторных структур 3-1, 3-2, ..., 3- n , чем исключается режим насыщения транзистора 4. Потенциалы в точках соединения транзисторных структур (диодов) последовательной приоритетной цепочки дискретно повышаются к ее началу. Потому с ростом измеряемого тока источника 2 последовательно загораются светодиоды 1- n , затем 1- $(n-1)$ и последним — светодиод 1-1, поскольку потенциал напряжения на его катоде самый высокий. На стабильности и линейности градуировочной характеристики такого МПК положительно ска-

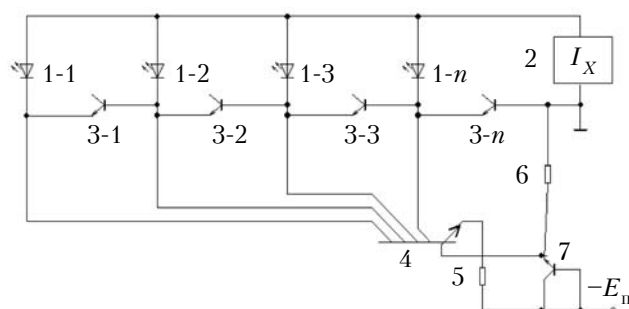


Рис. 6. Измеритель тока на интегральном многоколлекторном транзисторе

зываются идентичность параметров его интегральных элементов, а также исключение режима насыщения его транзисторов.

МПК с параллельной структурой присущ недостаток, особенно существенно проявляющийся при попытках реализации подобных устройств в интегральном исполнении. Он заключается в пропорциональном росте необходимой мощности рассеяния микросхемы с увеличением числа сравнивающих ячеек N , обеспечивающих требуемую точность измерения. Допустимая мощность рассеяния микросхемы накладывает ограничения на число сравнивающих ячеек и на выбор светодиодов индикаторной САШ. Они должны иметь не только идентичные параметры, но и одинаковую и достаточно высокую яркость свечения, небольшие значения номинального тока и прямого падения напряжения, а также низкую стоимость.

Оптоэлектронный вольтметр на многопороговом компараторе с каскодным включением сравнивающих транзисторов

Отмеченные недостатки в значительной мере устраняются при использовании МУК с каскодной структурой (**рис. 7**). Поскольку сравнивающие токовые переключатели на транзисторах 3 и 4 включены в нем каскодно, то потребляемый ток показывающего измерителя напряжения практически равен номинальному току только одного светодиода его оптической шкалы. Напряжения на выводах ступеней входного 1 и опорного 2 делителей напряжения устанавливаются такими, чтобы при нулевом значении входного измеряемого напряжения U_X входные транзисторные ключи 3-1, 3-2, ..., 3- n были открыты, а опорные 4-1, 4-2, ..., 4- n — заперты. При этом будет светиться только один индикаторный (нулевой) светодиод 10, показывающий, что прибор включен и готов к измерениям.

С увеличением входного напряжения U_X на входе потенциалы на выходах ступеней входного делителя напряжения 1 тоже соответственно

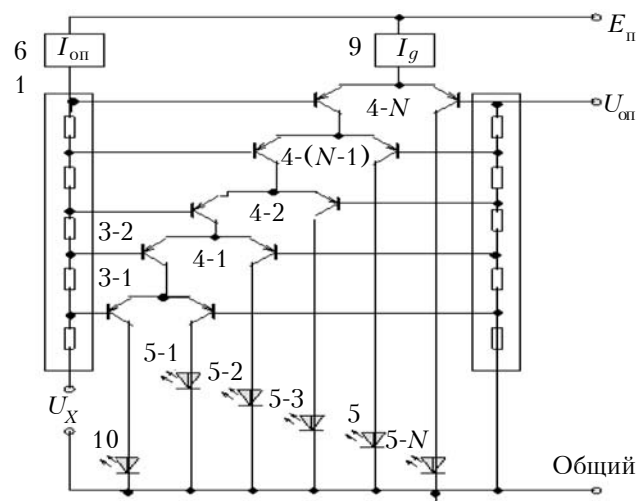


Рис. 7. Многоустойчивый компаратор напряжения с каскодным включением сравнивающих ячеек

будут нарастать на величину U_x . Поэтому напряжения на базах входных транзисторов 3-1, 3-2, ..., 3- n токовых переключателей поочередно, начиная с первого, уравниваются напряжениями на базах парных опорных транзисторов 4-1, 4-2, ..., 4- n токовых переключателей. Изменение соотношения потенциалов на базах входных транзисторов каждой пары вызывает последовательное отпирание опорных транзисторов ключей 4-1, 4-2, ..., 4- n переключателей МУК и одновременное запираение соответствующих им парных входных транзисторов 3-1, 3-2, ..., 3- n . По мере нарастания входного измеряемого напряжения U_x на оптической шкале прибора последовательно зажигаются и гаснут светодиоды 10, 5-1, 5-2, ..., 5- n .

Переключение каждой пары транзисторов переключателей происходит при определенном уровне измеряемого напряжения, которому соответствует включение светодиода, связанного с опорным транзистором данной пары. Индикация уровня входного напряжения осуществляется посредством перемещения светящейся метки по оптической шкале. Если кванты пороговых уровней этого МУК выбрать близкими напряжению переключения пар транзисторов ячеек сравнения, то при определенных значениях измеряемого напряжения будет проявляться неоднозначность, т. е. наблюдаться одновременное свечение двух соседних светодиодов. С изменением входных напряжений яркость одного светодиода будет нарастать, а другого падать вплоть до его полного погасания. Таким образом, за счет дискретно-аналогового характера отсчета показаний в приборе на МУК с каскодным включением сравнивающих ячеек, так же как и в приборах с параллельной структурой (рис. 5 и 6), можно оценивать соотношение токов через соседние светящиеся светодиоды. Этим существенно повышается разрешающая способность и точность измерений вольтметра со светодиодной оптической шкалой.

Следует отметить, что в каскодном МУК вместо светодиодов могут использоваться жидкокристаллические индикаторы. Для предотвращения их ускоренного старения рекомендуется применять импульсный режим питания МУК, который несложно обеспечить, если снабдить устройство импульсным генератором тока 9. Заменяв биполярные транзисторы такого МУК полевыми, можно выполнить миниатюрный вариант прибора с микроощным питанием.

Таким образом, используя предлагаемые схемотехнические решения построения многопороговых сравнивающих устройств, можно организовать промышленный выпуск достаточно точных, надежных и недорогих показывающих измерительных приборов с оптическими шкалами. Предлагаемые многопороговые сравнивающие устройства с плавным переключением в диапазонах квантования светодиодных индикаторов позволяют повысить разрешающую способность и точность измерительных приборов с дискрет-

но-аналоговым характером оптической шкалы. Они могут стать неплохой альтернативой пробникам [2], серийно выпускаемым зарубежными фирмами.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Аналоговые электроизмерительные приборы: Учеб. пособие для вузов / Под ред. Бишарда Е. Г. — Москва: Высшая школа, 1991. [Analogovye elektroizmeritel'nye pribory: Ucheb. posobie dlya vuzov / Pod red. Bisharda E. G. Moscow: Vysshaya shkola, 1991]
2. Теория пробников. Основы // Измерительные приборы и системы. — 2010. — № 2. — С. 44–47. [Teoriya probnikov. Osnovy // Izmeritel'nye pribory i sistemy. 2010. N 2. P. 44]
3. www.masterkit.ru
4. Быстров Ю. А., Гапунов А. П., Персианов Г. М. Сто схем с индикаторами. — Москва: Радио и связь, 1990. [Bystrov Yu. A., Gapunov A. P., Persianov G. M. Moscow: Radio i svyaz', 1990]
5. Ковальков В. И. О расширении функциональных возможностей сравнивающих устройств // Труды IV Всесоюзного симпозиума «Проблемы создания преобразователей форм информации». — Киев: Наукова думка, 1980. — С. 157–161. [Koval'kov V. I. O rasshirenii funktsional'nykh vozmozhnostei sravnivayushchikh ustroystv // Trudy IV Vsesoyuznogo simpoziuma «Problemy sozdaniya preobrazovatelei form informatsii». Kiev: Naukova dumka, 1980. P. 157]
6. Ковальков В. И. Индикаторы напряжений и сопротивлений на светоизлучающих диодах // Известия ВУЗ. Приборостроение. — 1983. — №10. — С. 81–85. [Koval'kov V. I. // Izvestiya VUZ. Priborostroenie. 1983. N 10. P. 81]

Дата поступления рукописи
в редакцию 25.05 2011 г.

Oborskii G. A., Koval'kov V. I., Tikhenko V. N., Slobodyanik P. T. **LED electric-measuring indicators for multithreshold comparators.**

Keywords: comparators, indicators, LED scales.

Construction principles of electric-measuring indicators with optical scales, controlled directly by multithreshold voltage or current comparators are considered. The introduced measuring devices with LED indicators with improved resolution may become an alternative to the series-produced foreign devices.

Ukraine, Odessa, ONPU.

Оборський Г. О., Ковальков В. І., Тихенко В. Н., Слободяник П. Т. **Світлодіодні показувальні електровимірювальні пристрої на багатопорогових компараторах.**

Ключові слова: компаратори, показувальні пристрої, світлодіодні шкали.

Розглянуто принципи побудови показувальних електровимірювальних пристроїв з оптичними шкалами, керованими безпосередньо багатопороговими компараторами напруги або струму. Запропоновані вимірювальні пристрої зі світлодіодними індикаторами з поліпшеною роздільністю можуть стати альтернативою пристроям, що серійно виробляються за кордоном.

Україна, м. Одеса, ОНПУ.