

ПРЯМООТСЧЕТНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛИ РАСХОЖДЕНИЙ ЕМКОСТЕЙ

Лубяный В.З., Голощапов С.С.

Селекторы каналов современных телевизионных приемников, радиоэлектронные системы с высокой степенью избирательности требуют комплектов варикапов с возможно более близкими вольтфарадными характеристиками (ВФХ). Поскольку современная полупроводниковая технология не может обеспечить изготовление варикапов с идентичными ВФХ, их необходимо комплектовать с тем, чтобы разброс ВФХ комплекта составлял бы не более нескольких процентов. Учитывая, что технология может обеспечить идентичность ВФХ лишь на уровне нескольких десятков процентов, а также массовость применения варикапов и то, что операция комплектования является одной из наиболее узких мест технологии их изготовления, методы и средства автоматического комплектования представляют практический интерес и эти вопросы являются весьма актуальными.

Методы комплектования можно разделить на неавтоматизированные (ручные) и автоматизированные (машинные).

Неавтоматизированные методы предусматривают чисто механический перебор варикапов партии по отношению к «опорному», при этом предусматривается только логическая обработка информации. Достоинство этих методов в относительной простоте реализации. Недостаток – относительно невысокий процент комплектуемости, поскольку не анализируются все возможные связи при комплектовании всей партии или хотя бы ее части.

Автоматизированные методы позволяют учесть все возможные комбинации варикапов в комплектах и выбрать из множества вариантов тот, который характеризуется наиболее высоким процентом комплектуемости.

Жесткие требования, предъявляемые к допустимому расхождению ВФХ комплекта (обычно не более 3-х процентов), диктуют необходимость разработки высокоскоростных измерителей емкости варикапов с очень высокой разрешающей способностью либо прямоотсчетных измерителей расхождений.

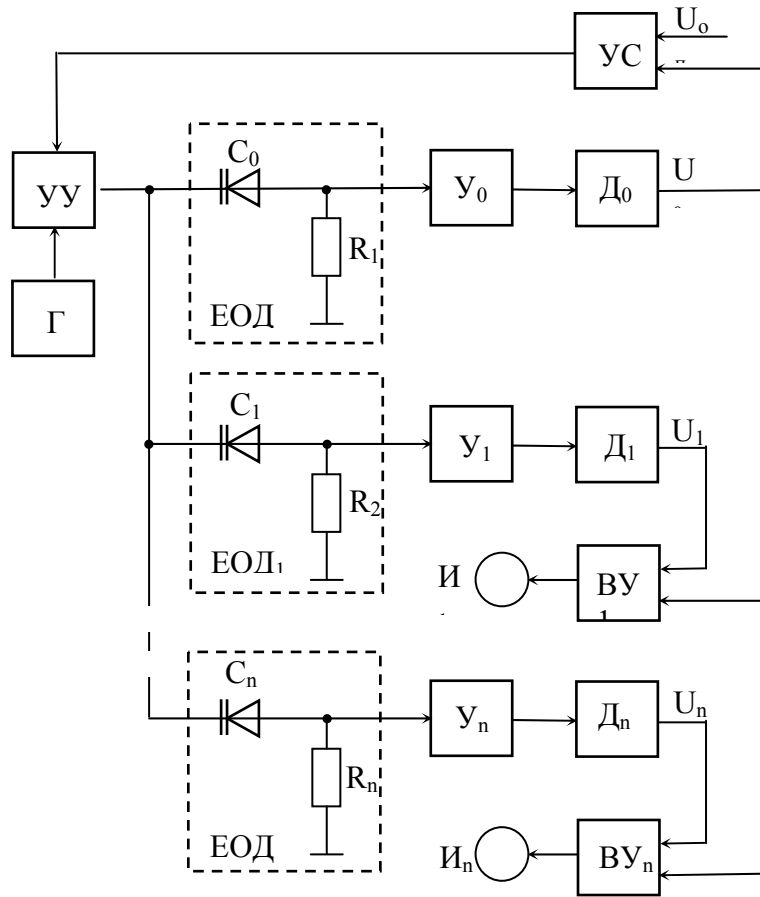
Первый вариант связан с большими техническими сложностями и к тому же он полностью не решает проблемы получения информации о степени идентичности ВФХ комплекта.

Разработка же прямоотсчетных измерителей расхождения по емкости задача более простая и вполне реализуема, к тому же проектирование подобных измерителей может базироваться на уже созданных структурах с временным и пространственным разделением каналов измерения, применяемых для регистрации степени идентичности двух варикапов.

Ниже представлены более совершенные схемы на основе емкостно-омического и емкостного делителей, реализующие операцию контроля степени идентичности ВФХ комплекта. При этом количество одновременно контролируемых варикапов принципиально не ограничено.

Схема на основе емкостно-омического делителя (рис.1) относится к схемам с пространственным разделением каналов измерения и предполагает одновременное получение информации о степени идентичности всех варикапов по отношению к «опорному».

Высокочастотное напряжение генератора Г через управляемый усилитель УУ поступает на входы всех емкостно-омических делителей ЕОД, выходные напряжения которых усиливаются усилителями У и детектируются амплитудными детекторами Д.



Г – генератор высокой частоты; УУ – управляемый усилитель; Ус – устройство сравнения; ЕОД – емкостно-омические делители; У – усилители высокой частоты; Д - амплитудные детекторы; ВУ – вычитающие устройства; И- индикаторы

Рис. 1 Схема прямоотсчетного измерителя расхождений по емкости с пространственным разделением каналов

Усиленная разность между напряжением U_0 напряжением U_{on} воздействует на управляемый усилитель, изменяя его передаточный коэффициент так, чтобы амплитуда выходного напряжения емкостно-омического делителя с «опорным» варикапом C_0 в плече оставалась неизменной.

Усиленные и протестированные напряжения всех емкостно-омических делителей $U_0...U_n$ подаются на входы вычитающих устройств, в которых происходит вычитание напряжения емкостно-омического делителя с «опорным» варикапом из напряжения емкостно-омического делителя с измеряемым варикапом.

Напряжение на выходе любого из детекторов $Д_1...Д_n$ определяется из выражения

$$U_i = \frac{U_{on} R_i C_i k_i}{R_0 C_0 k_0} \sqrt{\frac{1 + R_0^2 \omega^2 C_0^2}{1 + R_i^2 \omega^2 C_i^2}},$$

где U_{on} - напряжение опорного источника;

R_i, C_i - сопротивление резистора и емкость варикапа в плечах i -того делителя ($i=1,2,3,...,n$);

R_0, C_0 - сопротивление резистора емкостно-омического делителя с «опорным» варикапом и емкость «опорного» варикапа.

Если выполнить условия

$$R_0^2 \omega^2 C_0^2 \ll 1; \quad R_n^2 \omega^2 C_n^2 \ll 1; \quad (2)$$

$$R_0 = R_n; \quad k_0 = k_n, \quad (3)$$

то разность между напряжениями каналов с измеряемым и «опорным» варикапами с учетом (1) определится из выражения

$$\Delta U_n = U_0 \frac{C_n - C_0}{C_0}. \quad (4)$$

Описанный измеритель позволяет измерять одновременно расхождение по емкости любого из n варикапов по отношению к «опорному». При этом варикапы последовательно друг за другом поступают к измерителю.

Один из возможных алгоритмов комплектования варикапов с использованием данного измерителя заключается в том, что первый варикап выбирается в качестве «опорного» и включается в плечо емкостно-омического делителя ЕОД_п. Следующий варикап включается в плечо делителя ЕОД₀, подается смещение и контролируется расхождение между указанными варикапами индикатором I_n . Если расхождение не превышает установленной нормы, то варикап из делителя ЕОД₀ перегружается в делитель ЕОД_{п-1}. Следующий варикап подается в делитель ЕОД₀ и контролируется расхождение между ним и варикапами в делителях ЕОД_п и ЕОД_{п-1}. Далее описанные процессы повторяются.

Реализация данного измерителя требует несколько увеличенных аппаратных затрат, что является общим недостатком измерительных систем с пространственным разделением каналов. Однако в связи расширением номенклатуры и возможностей современной базы на интегральных микросхемах этот недостаток в значительной степени может быть скомпенсирован.

Повышение производительности измерителя при комплектовании варикапов, а также при контроле идентичности варикапов, подобранных в комплекты и варикапных матриц может быть достигнуто подачей напряжения смещения в виде импульса пилообразного напряжения (на рис.1 этот источник не показан). При этом время контроля зависит от постоянной времени детекторов и составляет не более 300 мс.

При необходимости изменения нормы на расхождение в фиксированных точках ВФХ целесообразно использовать импульсный режим смещения в виде импульса ступенчатого напряжения, переключая порог срабатывания синхронно с переключением ступеней напряжения смещения. При этом время контроля будет минимально возможным, так как для проведения операции контроля требуется однократная подача импульса ступенчатого напряжения.

Вторым существенным недостатком схемы является трудность выполнения условия (3), особенно в части равенства коэффициентов усиления «опорного» и i -того каналов измерения.

В этой части от схем с пространственным разделением каналов выгодно отличаются схемы с временным разделением каналов, не требующие построения идентичных каналов измерения. В таких схемах при определении степени идентичности величина выходного сигнала не зависит от параметров высокочастотного тракта (напряжения высокочастотного генератора и коэффициента передачи усилителя и детектора), что свидетельствует об их более высоких метрологических характеристиках. Схемы с временным разделением каналов описаны в [1].

Общим существенным недостатком схем на основе емкостно-омического делителя, как с пространственным, так и с временным разделением каналов является малое напряжение, снимаемое с токосъемного резистора.

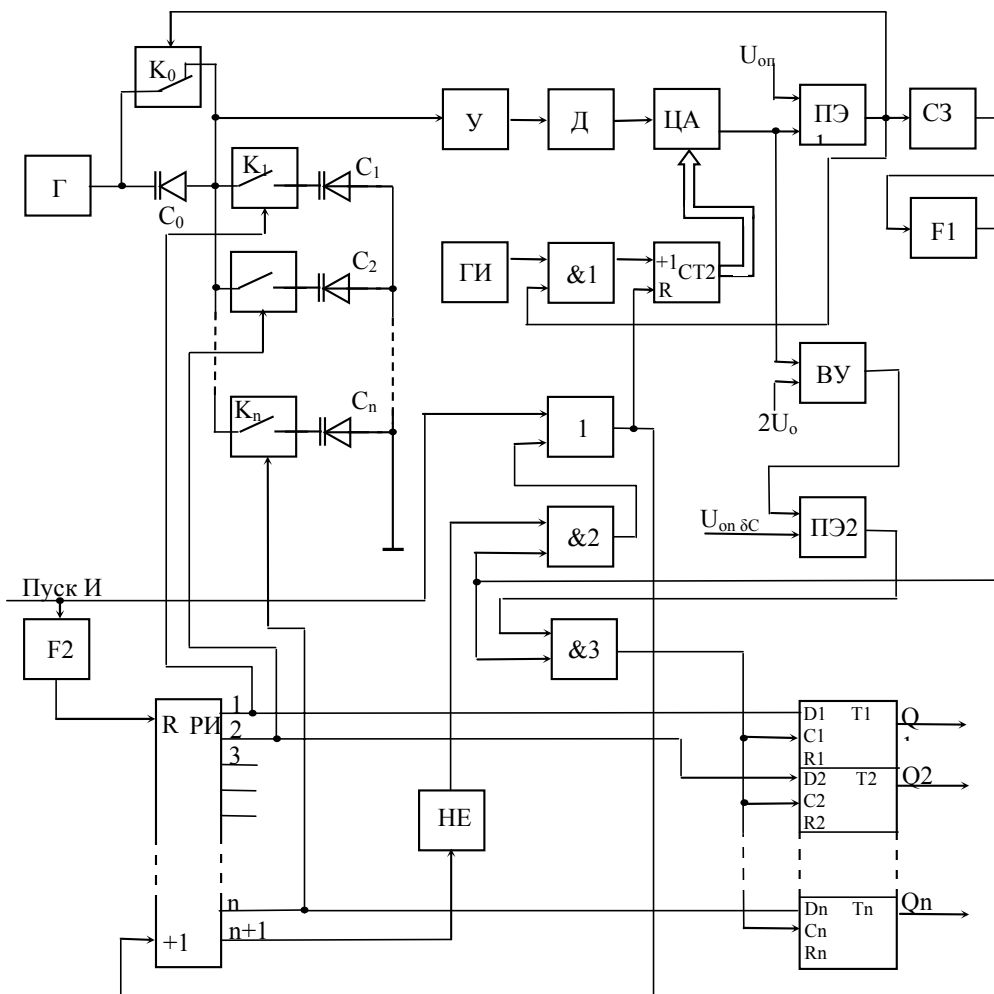
Поскольку варикап – нелинейный объект, величина высокочастотного напряжения на нем ограничивается десятками милливольт. Сопротивление токосъемного резистора с целью ограничения методической погрешности также должно быть небольшим. В итоге

величина падения напряжения на резисторе емкостно-омического делителя составляет не более нескольких милливольт. Следовательно, снимаемый с делителя сигнал нуждается в значительном (около 1000 раз) усилении, что сопровождается довольно ощутимым временным и температурным дрейфом коэффициента усиления высокочастотного тракта и появлением в сигнале значительной шумовой составляющей. Кроме того, метод емкостно-омического делителя обладает методической погрешностью. Поэтому приведенная схема может применяться для контроля комплектов варикапов с относительно большими уровнем емкости и допустимым процентом расхождения.

Для существенного увеличения сигнала, снимаемого с измерительной схемы, следует перейти к емкостному делителю, состоящему из двух последовательно соединенных емкостей.

Схемы с пространственным и временным разделением каналов для двух емкостей в приведенном решении не обладают методической погрешностью и описаны в [2].

Схема с временным разделением каналов для произвольного количества варикапов в комплекте на основе емкостного делителя, обладающая более высокими характеристиками в части стабильности, представлена на рис.2.



Г – генератор высокой частоты; $C_0 \dots C_n$ – измеряемые варикапы; $K_0 \dots K_n$ – ключи; У – усилитель высокой частоты; Д – амплитудный детектор; ЦАП – цифроаналоговый преобразователь; СТ2 – двоичный счетчик; & - схемы совпадения; ГИ - генератор импульсов; ПЭ – пороговые элементы; СЗ – схема задержки; F – формирователи импульсов; ВУ – вычитающее устройство; 1 – схема «ИЛИ»; РИ – распределитель импульсов; НЕ – инвертор; $T_1 \dots T_n$ – триггера.

Рис. 2 Схема прямоотсчетного измерителя расхождений по емкости с временным разделением каналов

В исходном состоянии схемы ключ K_0 находится в замкнутом состоянии, как показано на рисунке, в счетчике СТ2 хранится такой код, что напряжение на выходе ЦАП превышает порог срабатывания порогового элемента ПЭ1, который выдает потенциал, запрещающий прохождение тактовых импульсов от генератора ГИ на вход счетчика СТ2. Генератор Г высокой частоты вырабатывает синусоидальное напряжение частоты, при которой производится измерение емкостных параметров варикапов $C_0 \dots C_n$, которое усиливается и детектируется соответственно усилителем У и детектором Д и поступает на аналоговый вход ЦАП.

Передним фронтом импульса «Пуск И» через формирователь F2 обнуляется распределитель импульсов РИ, одновременно этим же импульсом обнуляется счетчик СТ2, напряжение на выходе ЦАП становится равным нулю, пороговый элемент ПЭ1 выдает потенциал, устанавливающий ключ K_0 в разомкнутое состояние, и разрешает прохождение тактовых импульсов от генератора ГИ через схему &1 на вход счетчика СТ2. Одновременно в распределитель импульсов РИ добавляется единица, на его выходе 1 устанавливается потенциал, включающий ключ K_1 , подключающий варикап C_1 , который с варикапом C_0 образуют емкостной делитель. Одновременно на вход D1 триггера Т1 поступает разрешающий потенциал.

Сигнал $U_{\partial 1}$ на выходе детектора равен:

$$U_{\partial 1} = \frac{U_2 \cdot k_y}{\frac{1}{\omega C_0} + \frac{1}{\omega C_1}} \cdot \frac{1}{\omega C_1} = U_2 \cdot k_y \cdot \frac{C_0}{C_0 + C_1}, \quad (1)$$

где $U_{\partial 1}$ – напряжение на выходе детектора при подключении варикапа C_1 ;
 U_2 – напряжение генератора,
 k_{y1} – общий коэффициент усиления усилителя У и детектора Д при подключении варикапа C_1 ;
 ω – круговая частота измерения.

По мере заполнения счетчика СТ2 растет напряжение на выходе ЦАП. При достижении им значения, определяемого порогом срабатывания элемента ПЭ1, на выходе ЦАП формируется потенциал, запрещающий прохождение тактовых импульсов на вход счетчика. На выходе ЦАП получаем:

$$U_{\partial 1} \cdot k_1 = U_{on}, \quad (2)$$

где k_1 – коэффициент передачи ЦАП при подключении варикапа C_1 ,
 U_{on} – порог срабатывания элемента ПЭ1.
 Значение k_1 в виде кода хранится в счетчике СТ2.

С появлением запрещающего потенциала на выходе ПЭ1 ключ K_0 переходит в замкнутое состояние. В этом случае сигнал на выходе ЦАП равен:

$$U_{2-1} = U_2 \cdot k_y \cdot k_1, \quad (3)$$

Или с учетом (1) и (2):

$$U_{2-1} = U_2 \cdot k_y \cdot \frac{U_{on}}{U_2 \cdot k_y} \cdot \frac{C_0 + C_1}{C_0} = U_{on} + U_{on} \frac{C_1}{C_0}.$$

Тогда на выходе вычитающего устройства ВУ получим

$$U_{\text{вых1}} = U_{\text{он}} \frac{C_1}{C_0} - U_{\text{он}} = U_{\text{он}} \frac{\Delta C_1}{C_0} = U_{\text{он}} \delta C_1,$$

где $\delta C_1 = \frac{\Delta C_1}{C_0} = \frac{C_0 - C_1}{C_0}$ - относительная величина степени расхождения емкостей C_0 и C_1 .

Полученный сигнал сравнивается с предельно допустимым $U_{\text{он}\&C}$ на пороговом элементе ПЭ2 и в виде сигнала «годен-брак» поступает на вход схемы совпадения &3, на второй вход которой приходит задержанный и сформированный сигнал срабатывания ПЭ1. Время задержки схемы СЗ определяется временем срабатывания реле K_0 и установления переходных процессов, возникших в результате закорачивания варикапа C_0 . В результате в триггере Т1 запоминается информация о степени идентичности пары варикапов C_0 - C_1 .

Этот же задержанный импульс через блок совпадения &2 и схему «ИЛИ» добавляет единицу в распределитель РИ, подключая варикап C_2 , и обнуляет счетчик СТ2, цикл повторяется.

На выходе ВУ в конце цикла появляется сигнал

$$U_{\text{вых2}} = U_{\text{он}} \frac{C_2}{C_0} - U_{\text{он}} = U_{\text{он}} \frac{\Delta C_2}{C_0} = U_{\text{он}} \delta C_2,$$

где $\delta C_2 = \frac{\Delta C_2}{C_0} = \frac{C_0 - C_2}{C_0}$ - относительная величина степени расхождения емкостей C_0 и C_2 .

Затем подключается третий варикап и т. д. В результате на выходе ВУ в момент замкнутого состояния ключа K_0 периодически возникает сигнал, пропорциональный степени расхождения емкостей варикапов $C_2 \dots C_n$ по отношению к варикапу C_0 . Эта информация в виде сигнала «годен-брак» запоминается в триггерах Т1...Тn.

На последнем цикле в распределителе РИ активизируется выход n+1, на схему &2 приходит запрещающий потенциал, счетчик СТ2 не обнуляется, схема переходит в исходное состояние.

Следует отметить, что выходной сигнал устройства (рис.2) не зависит от параметров генератора и усилителя высокой частоты, что выгодно отличает приведенную схему в части ее стабильности. Следовательно, эту схему можно рекомендовать для варикапов с минимальной емкостью, т. е. наиболее распространенных типа КВ122, используемых в селекторах телевизионных приемников.

При необходимости контролировать степень идентичности по всей ВФХ испытуемых варикапов устройство следует дополнить памятью, где будут храниться в цифровом виде значения коэффициентов k_i .

Схема эта относится к схемам с временным разделением каналов. Естественно, эта схема требует больше времени на формирование измерительного сигнала δC_i , однако при современной элементной базе это время относительно невелико. В частности, применение герконовых реле позволяет уменьшить время срабатывания ключей до нескольких (около 5) миллисекунд. Формирование кода k_i в приведенном варианте (последовательном счете) занимает примерно такое же время, а при использовании метода поразрядного уравнивания (реализуемого на базе интегральной микросхемы типа К155ИР17) не более 1 миллисекунды. В результате суммарное время контроля параметров комплекта из 20 варикапов в 8-ми точках ВФХ с учетом переходных процессов, возникающих в результате коммутации, занимает не более 300 мс, что вполне приемлемо.

По сравнению со схемами на основе емкостно-омического делителя приведенная схема не имеет методической погрешности.

Существенным недостатком, ограничивающим применение схемы, приведенной на рис.2 является то, что схема может контролировать степень расхождения варикапов $C_1...C_n$ только по отношению к варикапу C_0 . При необходимости проконтролировать степень расхождения других пар емкостей, например, C_1 и C_2 или C_2 и C_4 , необходимо либо воспользоваться алгоритмом комплектования, описанном для схемы рис.1, либо изменить схему коммутатора.

В случае применения приведенного алгоритма трудность состоит в реализации перемещений варикапов с одной измерительной позиции на другую. При использовании же специализированного коммутатора загрузка всей партии приборов на измерительные позиции осуществляется один раз, а при обработке результатов измерений возможно получение полной картины о всех всевозможных «парах» варикапов и при анализе получение максимального числа комплектов из данной партии.

Один из вариантов коммутатора, который позволяет в качестве «опорного» использовать любой из варикапов $C_1...C_n$ и по отношению к нему проверять все остальные варикапы, представлен на рис.3.

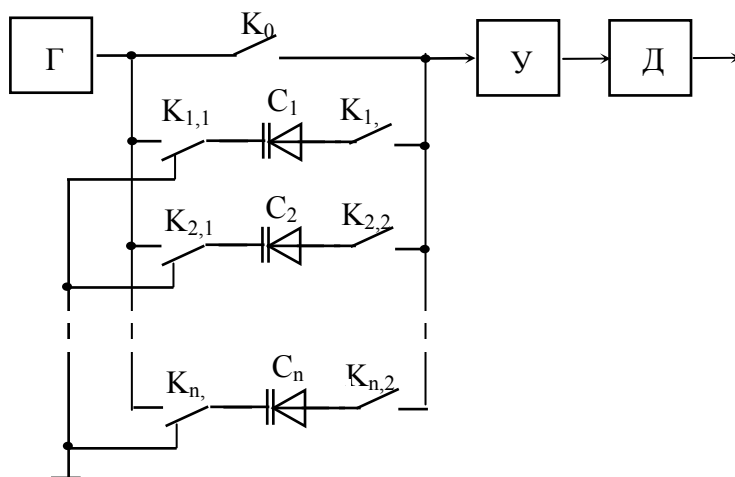


Рис. 3 Схема коммутатора

Если в качестве «опорного» берется варикап C_1 , замыкаются контакты $K_{1,1}$ и $K_{1,2}$, варикап, который проверяется на идентичность по отношению к «опорному», допустим C_2 , подключается путем срабатывания $K_{2,2}$, образуя с C_1 емкостной делитель. Информация об идентичности контролируемой пары возникает при срабатывании K_0 .

Естественно, схема управления коммутатором изменится, как и схема регистрации степени годности контролируемых пар. В приведенном варианте коммутатора можно контролировать любую пару измеряемого комплекта.

Следует также отметить, что любую пару варикапов, допустим C_1 - C_2 можно контролировать, взяв в качестве «опорного» или C_1 или C_2 , при этом одна из указанных емкостей будет больше, другая меньше. Соответственно, если при определении степени расхождения делить на большее из указанных значений, получим заниженное значение δC , на меньшее – завышенное. Такой же эффект можно получить, если информацию с триггеров, в которых хранится результат, направить на схему «ИЛИ» или на схему «ИЛИ». При этом срабатывание схемы «ИЛИ» даст эффект деления на меньшее из значений C_1 и C_2 , схемы «ИЛИ» – на большее. При допустимом расхождении 3% эта разница составляет примерно 0,1%, однако при больших допустимых расхождениях она может достигать ощутимой величины и существенно влиять на процент комплектования варикапов в партии. Так, при

допустимом отклонении 6% эта разница составляет уже 0,34%, что существенно корректирует зону комплектования, так как зона сокращается на $0,34/6 = 5,67\%$.

Выводы:

Прямоотсчетные измерители расхождений с пространственным разделением каналов требуют идентичных с высокой точностью каналов измерения, что практически трудно реализуемо. В измерителях расхождений с временным разделением каналов это требование отсутствует, поэтому они более пригодны для измерений комплектов варикапов с малыми емкостями.

Измерители на основе емкостно-омического делителя обладают низкой разрешающей способностью из-за наличия в измерительном сигнале значительной шумовой составляющей. Существенно повысить соотношение сигнал-шум возможно с применением емкостного делителя.

Structures of measuring instruments of capacitance - voltage characteristics divergences of varycaps in the complete set on the basis of schemes of capacitance-ohmic and capacitor dividers with spatial and time division of measurement channels are considered. Schemes of measuring instruments and algorithm of varycaps acquisition are developed. Analysis of their accuracy characteristics is made and scopes of the considered measuring instruments are defined.

1. Голощапов С.С. Автоматизация измерений и контроля высокочастотных параметров в микроэлектронике. Херсон.: ХГТУ, 2001-176с.
2. Голощапов С.С. Измерение емкости методом емкостного делителя. // Электрический журнал. – 2000. - №2. – С. 23 – 26.