

Особенности радиационных испытаний аналоговых микросхем

О.В. Дворников¹, В.А. Чеховский²

¹Открытое акционерное общество “МНИПИ”, Беларусь, г. Минск, Российско-Белорусский научно-технический центр аналоговой и дискретно-аналоговой микросхемотехники “МикАн” (СКНЦ ВШ), Россия, г. Таганрог, oleg_dvornikov@tut.by

²Научно-исследовательское учреждение «Национальный научно-учебный центр физики частиц и высоких энергий Белгосуниверситета», Беларусь, г. Минск, Vladimir.Tchekhovski@cern.ch

Аннотация — Рассмотрены схемы включения и выбор входного сигнала аналоговых микросхем при радиационных испытаниях, предложены критерии оценки суммарного изменения параметров при радиационном воздействии. Сформулирована последовательность работ при радиационных испытаниях и описана блок-схема испытательной установки, особое внимание уделено регистрации одиночных событий.

Ключевые слова — Радиационная стойкость, дистанционное измерение параметров, аналоговые микросхемы, одиночные события, кратковременный сбой.

I. ВВЕДЕНИЕ

Растущая потребность рынка в сложных микроэлектронных устройствах, функционирующих при воздействии проникающей радиации (ПР), выявила необходимость увеличения соответствия результатов радиационных испытаний интегральных микросхем (ИМС) реальным изменениям характеристик в рабочих условиях. Актуальность указанной проблемы обусловлена тем, что уменьшение размеров интегральных элементов привело к увеличению чувствительности их характеристик к воздействию тяжелых заряженных частиц и проявлению одиночных событий (*single event effects, SEE*) [1]. С другой стороны, типичный подход к установлению критерия радиационной стойкости, заключающийся в нормировании допустимого ухода параметров после прекращения воздействия ПР, не гарантирует сохранения работоспособности аналогового устройства в процессе радиационного воздействия и требует корректного выбора параметров, определяющих радиационную стойкость. Так, экспериментальные исследования влияния ПР на характеристики операционных усилителей (ОУ) позволили установить, что при допустимом по техническим условиям изменении напряжения смещения нуля после радиа-

ционного облучения, функционирование ОУ во время воздействия ПР не сохраняется [2].

Совершенствованию радиационных испытаний посвящен ряд публикаций [2-4], в которых изучены особенности изменения характеристик ОУ при импульсном ионизирующем излучении, развиты методы дистанционных измерений коэффициента усиления ОУ с использованием цифровых осциллографов, рассмотрен выбор критериев радиационной стойкости.

К сожалению, в указанных работах не уделено внимание учету *SEE*-эффектов и выбору режима работы аналоговых ИМС, хотя экспериментальные исследования выявили зависимость радиационных изменений параметров некоторых ОУ от вида подаваемого на входы сигнала (постоянный или синусоидальный [5]), наличия или отсутствия электрического режима во время радиационного воздействия.

В [6, 7] предприняты попытки классификации и экспериментальной регистрации одиночных событий. Указано, что они приводят к параметрическим и катастрофическим отказам.

Катастрофические отказы вызываются такими необратимыми эффектами как: выгорание (*single event burnout, SEB*), разрыв межсоединений (*single event gate rupture, SEGR*), «защелкивание» или тиристорный эффект (*single event latchup, SEL*). Параметрические (обратимые) отказы заключаются в кратковременных сбоях (*single event upsets, SEU*), которые для логических схем проявляются в виде «ложных» сигналов, распространяющихся по схеме, а для аналоговых – в коротких (от 0,1 до 10 нс) импульсах выходного напряжения с амплитудой от положительного до отрицательного напряжения питания [6].

Заметим, что к «защелкиванию» полупроводниковых структур могут привести не только тяжелые заряженные частицы, но и фототоки, возникающие при

ионизирующем излучении, величина которых пропорциональна площади p - n -переходов и мощности поглощенной дозы. Ограничение тока потребления ИМС во время «зашелкивания» позволяет избежать катастрофического отказа, при этом для повторного использования микросхемы потребуется перезапуск источников напряжения питания.

Целью настоящей статьи является рассмотрение методов радиационных испытаний аналоговых устройств (ОУ, компаратора напряжения, трансрезистивного усилителя), основанных на выборе схем включения, вида и амплитуды входных сигналов, разделения и отдельной оценки эффектов «зашелкивания» и кратковременных сбояв.

II. ОЦЕНКА РАДИАЦИОННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ АНАЛогоВЫХ МИКРОСХЕМ

Известны и широко применяются методы определения параметров ОУ на основе результатов их измерений с различными цепями отрицательной обратной связи (ОС) [8]. Применение указанных методов при радиационном воздействии затруднительно из-за необходимости высокоточного измерения малых сигналов электронных устройств, значительно удаленных от контрольно-измерительной аппаратуры, в условиях помех. С нашей точки зрения, для радиационных испытаний аналоговых микросхем целесообразно применение иного подхода, а именно максимально точное определение параметров ИМС до и после воздействия ПР и контроль их работоспособности в процессе облучения.

Для контроля функционирования ОУ при облучении рекомендуется применять модифицированный и уточненный нами известный метод измерений параметров с использованием цифровых осциллографов [3], базирующийся на схеме включения ОУ в режиме усиления напряжения (рис. 1).

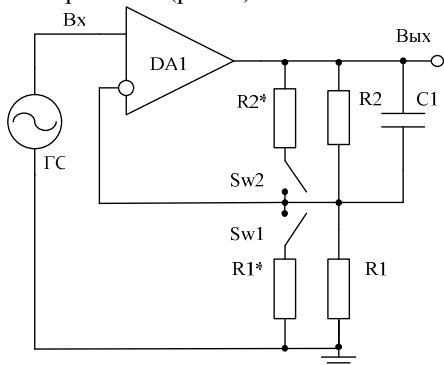


Рис. 1. Схема включения ОУ в режиме усиления напряжения

Для схемы рис. 1 коэффициент усиления ОУ с замкнутой цепью обратной связи ($K_{ОУОС}$) обычно определяется параметрами ОС ($K_{ОУОС} \approx 1 + R_2/R_1$) и зна-

чительно (не менее, чем в 100 раз) меньше коэффициента усиления ОУ с разомкнутой цепью обратной связи ($K_{ОУ}$). Как указано в [3], в этих условиях большие изменения $K_{ОУ}$ сопровождаются малыми изменениями выходного напряжения $U_{ВЫХ}$, что затрудняет выполнение оценок изменений $K_{ОУ}$ непосредственно после воздействия ПР (из-за нестабильности входного напряжения и недостаточной чувствительности осциллографов). Цифровые осциллографы позволяют регистрировать амплитуды выходного сигнала непосредственно до и после воздействия и повысить точность определения этих амплитуд за счет усреднения при последующей математической обработке цифровых осциллограмм.

Если на вход неинвертирующего усилителя (рис. 1) подать синусоидальный сигнал, в котором постоянная составляющая ($U_{ВХ}$) равна нулю, а переменная составляющая характеризуется ненулевой величиной амплитуды ($u_{ВХ}$), то выходное напряжение ОУ ($U_{ВЫХСУМ}$) будет содержать постоянную ($U_{ВЫХ}$) и переменную ($u_{ВЫХ}$) составляющие, которые при выполнении условия $R_2/R_1 \gg 1$ можно определить по соотношениям:

$$U_{ВЫХ} \approx U_{СМ} \frac{R_2}{R_1} + I_{ВХ} R_2, \quad (1)$$

$$u_{ВХ} \approx u_{ВЫХ} \left(\frac{R_1}{R_2} + \frac{1}{K_{ОУ}} \right), \quad (2)$$

где $U_{СМ}$ – напряжение смещения нуля ОУ, $I_{ВХ}$ – входной ток по инвертирующему входу.

Возможное изменение выходного сигнала ОУ в этом случае иллюстрирует рис. 2.

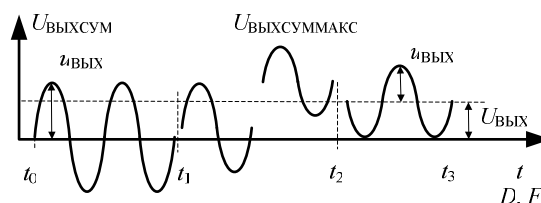


Рис. 2. Возможное изменение выходного сигнала ОУ при радиационном воздействии

На рис. 2 предполагается, что влияние ПР прямо пропорционально времени облучения (т.е. поглощенной дозе $D(t)$ или интегральному потоку частиц $F(t)$) и приняты обозначения: t_0 – момент включения источников напряжения питания, t_1 (t_2) – включение (выключение) источника ПР, t_3 – время хранения. За промежуток времени t_1-t_0 осуществляется проверка работоспособности ИМС в нормальных условиях; t_2-t_1 – время набора требуемой поглощенной дозы (интегрального потока частиц) и контроля параметров при облучении; t_3-t_2 – время хранения, в течение которого возможно некоторое возвращение параметров к начальным значениям, так называемый «отжиг».

Если при радиационном облучении ОУ задавать нулевую постоянную составляющую $U_{ВХ}=0$ и фиксированную амплитуду входного синусоидального сигнала $u_{ВХ}=const$, то в выходном сигнале возникнет постоянная составляющая, описываемая соотношением (1), а изменение коэффициента усиления ОУ от величины $K_{ОУ1}$ до величины $K_{ОУ2}$ приведет к изменению амплитуды выходного напряжения от $u_{ВЫХ1}$ до $u_{ВЫХ2}$ в соответствии с равенством

$$\frac{R_1 K_{ОУ2}}{R_2} = \frac{1}{\frac{u_{ВЫХ1}}{u_{ВЫХ2}} \left(1 + \frac{R_2}{R_1 K_{ОУ1}} \right) - 1}. \quad (3)$$

В экспериментальной установке рекомендуется принять меры к предотвращению самовозбуждения ОУ и предусмотреть дистанционное изменение сопротивлений резисторов ОС таким образом, чтобы поддерживать постоянным их соотношение $R_2/R_1=const$ и значительно изменять величину R_2 , что позволит с помощью соотношения (1) отдельно оценить изменение $U_{СМ}$ и $I_{ВХ}$. Для устранения причин самовозбуждения применяется неинвертирующее включение ОУ. Кроме того, целесообразно: выбрать небольшую величину $K_{ОУОС}$; осуществить ограничение полосы пропускания, например, с помощью конденсатора C_1 на рис. 1; максимально увеличить амплитуду входного сигнала, таким образом, чтобы при возможном уменьшении амплитуды $u_{ВЫХ}$ и сдвиге постоянного уровня $U_{ВЫХ}$ максимальное выходное напряжение $U_{ВЫХСУММАКС}$ не достигло уровня ограничения выходного каскада ОУ; шунтировать цепи питания конденсаторами, размещенными около выводов ИМС.

При выборе частоты синусоидального напряжения следует учитывать взаимоисключающие факторы. Чем выше частота, тем большее количество результатов измерений можно усреднить за короткий промежуток времени, в течение которого $D(t)$ или $F(t)$ допустимо считать неизменными, и таким образом увеличить точность определения параметров. Однако, при высокой частоте входного сигнала возможно появление искажений выходного напряжения, вызванных влиянием амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) ОУ и паразитных емкостей соединительных кабелей. Хотя влияние АЧХ можно учесть при известных характеристиках ОУ, выбор параметров синусоидального сигнала целесообразно осуществлять экспериментально, т.е. изменяя частоту и амплитуду сигнала на входе ОУ, расположенного в установке для радиационных испытаний, определить появление искажений выходного сигнала на экране цифрового осциллографа.

Компараторы напряжения часто характеризуются показателями технического уровня, аналогичными принятым для ОУ, а именно: входным током, разностью входных токов, коэффициентом усиления, на-

пряжением смещения и др. Такое нормирование параметров обусловлено тем, что ОУ и компаратор обычно имеют близкие схемотехнические решения. Однако ОУ работают с отрицательной ОС, которая поддерживает равным нулю входное дифференциальное напряжение и большинство параметров ОУ измеряются в режиме малого сигнала. Компараторы напряжения не применяются с ОС и функционируют в режиме большого сигнала, а некоторые компараторы, например, с выходным каскадом типа «открытый коллектор», невозможно включить с ОС. В связи с указанным, методики и режимы измерений ОУ не следует применять к компараторам, так как полученные при таких измерениях параметры компараторов не будут характеризовать их типовые режимы эксплуатации.

При изучении радиационного изменения параметров компараторов рекомендуется соединять их входы через резисторы с источниками сигналов (например, на рис. 3 $U_{ВХ-}$ – источник регулируемого постоянного напряжения, $u_{ВХ+}$ – источник напряжения с нулевой постоянной составляющей и регулируемой амплитудой синусоидального сигнала) и регистрировать форму выходного сигнала по каждому из выходов компаратора (рис. 4).

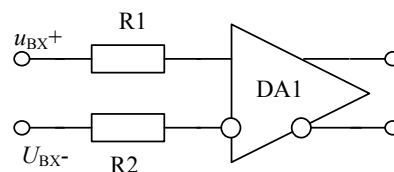


Рис. 3. Схема включения компаратора напряжения

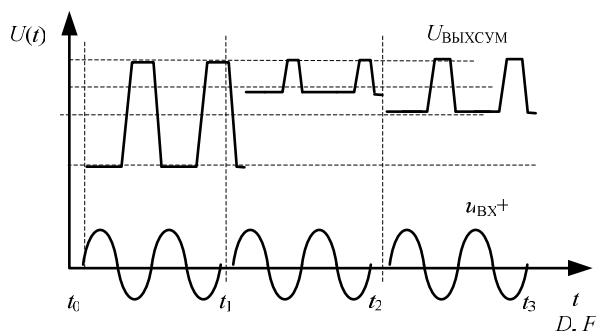


Рис. 4. Возможное изменение выходного сигнала компаратора при радиационном облучении

До радиационного воздействия необходимо зафиксировать зависимость скважности выходных импульсов компаратора, расположенного в экспериментальной установке, от изменения постоянного напряжения $U_{ВХ-}$ при постоянной амплитуде синусоидального напряжения $u_{ВХ+}$. В процессе облучения возможно увеличение входных токов и изменение напряжения смещения компаратора. Суммарное действие указан-

ных факторов можно оценить по изменению скважности выходных импульсов при нулевом постоянном напряжении на обоих входах, предполагая, что при одинаковом изменении скважности импульсов до и во время облучения, суммарное действие входных токов и напряжения смещения при облучении идентично действию постоянного напряжения $U_{ВХ}$.

Трансрезистивный усилитель представляет собой преобразователь ток-напряжение, который характеризуется низким входным и выходным сопротивлениями, постоянным коэффициентом преобразования. Трансрезистивный усилитель функционирует без ОС и его работоспособность при воздействии ПР допустимо проверить по схеме рис. 3 при значительном увеличении сопротивления резисторов R_2 и R_1 , так чтобы они формировали входной токовый сигнал.

Для ИМС с субмикронными размерами элементов актуально регистрировать одиночные события. Из рассмотренных ранее *SEE*-эффектов, для аналоговых микросхем наиболее значимы тиристорный эффект (*SEL*) и кратковременные сбои (*SEU*). Отличие указанных эффектов заключается в том, что при *SEU*-эффекте на выходе аналогового устройства появляется «ложный» кратковременный импульс напряжения и, следовательно, «всплеск» тока потребления, но не происходит потеря работоспособности микросхемы. *SEL*-эффект вызывает значительное и продолжительное увеличение тока потребления, прекращение функционирования ИМС, которое может быть устранено только при выключении и повторном включении источников напряжения питания, т.е. перезапуске напряжения питания.

Для регистрации *SEU*-эффекта рекомендуется считать импульсы выходного напряжения аналогового устройства при постоянном напряжении на его входах. Основной проблемой при таком подходе является установление в счетной схеме минимальной величины регистрируемого выходного импульса. Принятый в [6] критерий *SEU*-события (импульс выходного напряжения с размахом от положительного до отрицательного напряжения питания) является явно завышенным и не учитывает ряд одиночных событий, влияющих на работоспособность ИМС. Теоретический подход, при котором *SEU*-событие наступает, если появляется выходной импульс с размахом (от минимального до максимального значения) превышающим 5 среднеквадратических значений напряжения выходного шума, затруднительно реализовать экспериментально, так как шумы аналогового устройства изменяются при облучении. С нашей точки зрения, при радиационных испытаниях целесообразно применение инженерного критерия, а именно предполагается, что *SEU*-событие происходит, если при входном постоянном напряжении на выходе аналогового устройства появляется кратковременный им-

пульс с размахом более 10% типового выходного сигнала.

Методика обнаружения *SEL*-эффекта базируется на зависимости тока потребления от времени облучения, приведенной на рис. 5.

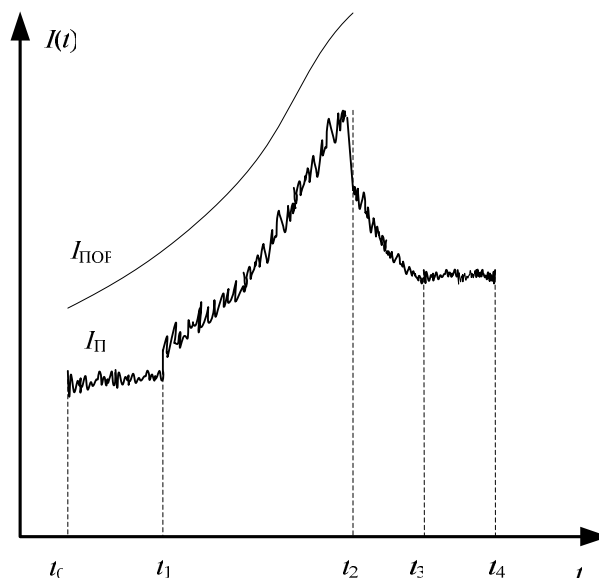


Рис. 5. Предполагаемое изменение тока потребления $I_{П}$ и следящего порога $I_{ПОР}$ при радиационном воздействии

Предполагается монотонное изменение тока потребления, которое справедливо при монотонном изменении параметров интегральных элементов в зависимости от поглощенной дозы или интегрального потока частиц и преобладающем влиянии одного из параметров (фототока или сопротивления резисторов).

При регистрации *SEL*-событий рекомендуется использовать следящий порог: за оговоренное количество периодов входного синусоидального напряжения определяется среднеквадратическое значение тока потребления ($I_{ПСКЗ}$) и устанавливается величина порогового тока ($I_{ПОР}$), при превышении которого источники напряжения питания автоматически отключаются и находятся в выключенном состоянии до повторного включения (перезапуска). Время выключения определяется возможностями аппаратуры и не должно превышать 1 мкс. Каждый перезапуск источников напряжения питания рассматривается как *SEL*-событие. Обычно $I_{ПОР} = K_{ПОР} \cdot I_{ПСКЗ}$, где $K_{ПОР}$ находится в диапазоне от 1,5 до 2. Время перезапуска, с одной стороны, должно быть достаточным для регистрации отдельных *SEL*-событий, а с другой стороны, не должно влиять на оценку частоты их следования.

III. ПРОВЕДЕНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ

Углубленный маршрут радиационных испытаний, поясняющий цикл измерений/испытаний, показан на рис. 6, а на рис. 7 приведена блок-схема установки для

измерений во время облучения и регистрации оди- нуклидных (не импульсных) источников.

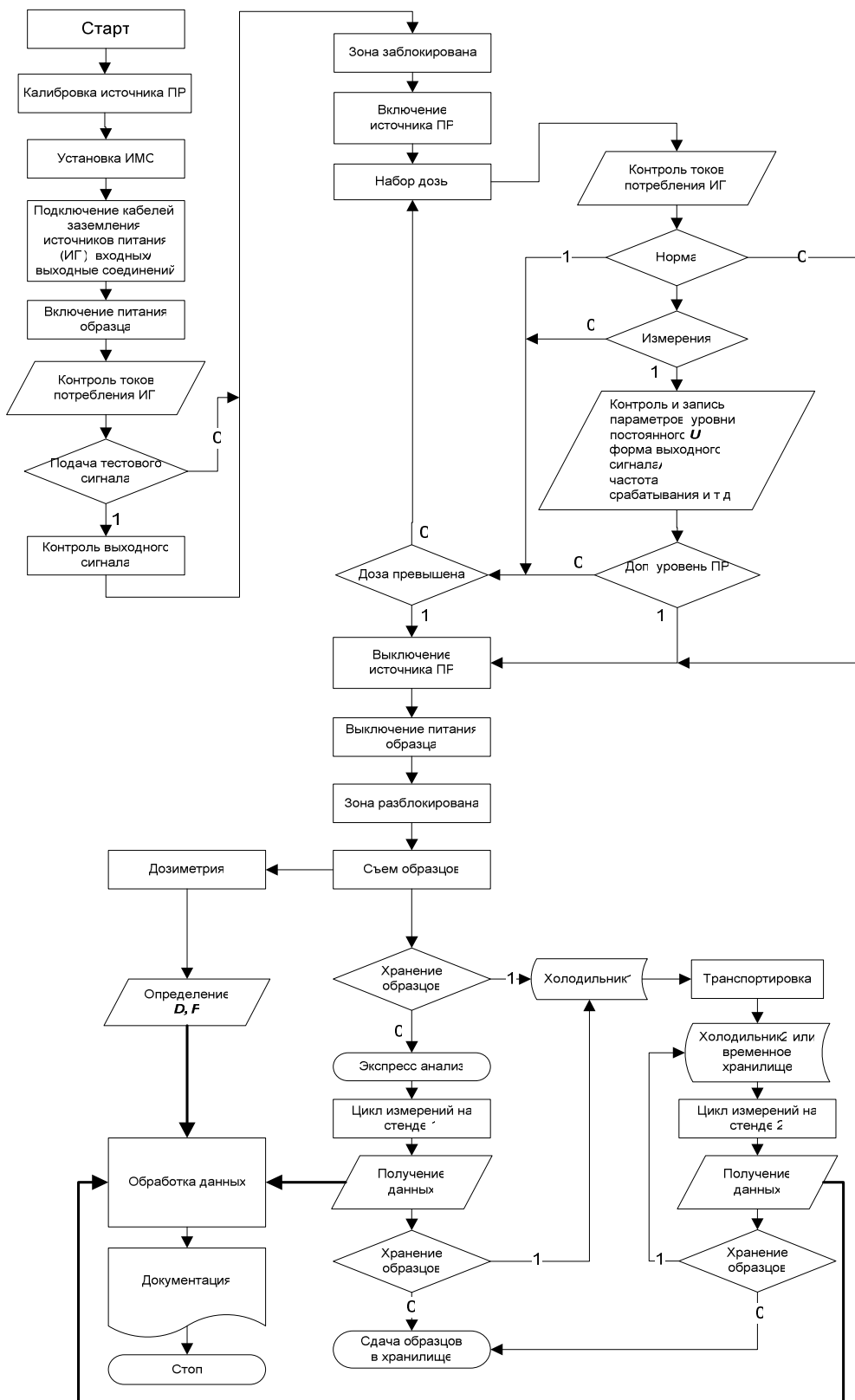


Рис. 6 Маршрут радиационных испытаний

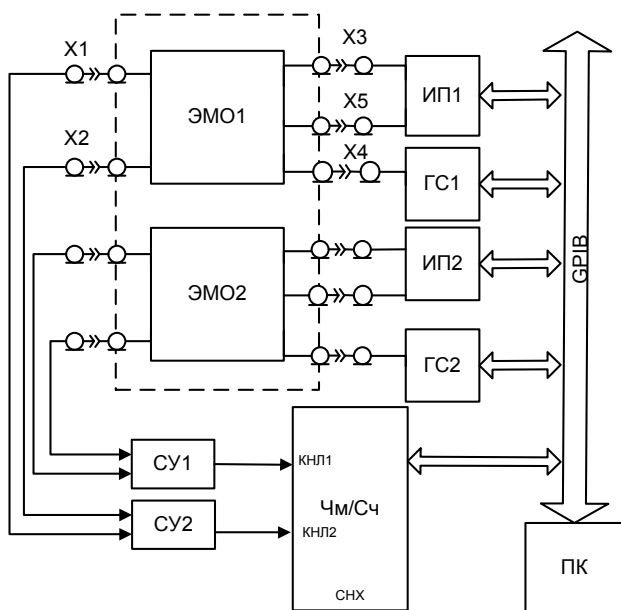


Рис. 7. Блок-схема установки для измерений при радиационном облучении

Напряжение питания поступает от источников ИП1 и ИП2 через разъемы X3 и X5. При исследовании ИМС компараторов постоянное входное напряжение задается от генераторов напряжения произвольной формы ГС1 или ГС2, включенных в режиме источников постоянного уровня. Сигналы, вызванные SEU-событиями с выходных разъемов X1 и X2 через согласующие устройства СУ1 и СУ2 подаются на счетные входы частотомера. Применяется оборудование фирмы Agilent в том числе: двухканальный частотомер/счетчик импульсов или цифровой осциллограф HP «Infiniium 54830B», генераторы сигналов произвольной формы, двухканальные источники питания, интерфейсная плата HP PCI – GPIB. Кроме того, используются специализированное оборудование: электронные модули с образцами ИМС (ЭМО) и согласующие устройства СУ.

Измерительное оборудование и персональный компьютер (ПК) объединены в единую систему с помощью внешней шины GPIB. ПК управляет процессом измерений с помощью специализированного программного обеспечения, разработанного в среде «VEE» (Hewlett Packard). Цикл измерений может быть полностью автоматизированным, а также прерываться и возобновляться командами операторов. Особенностью используемой конфигурации является возможность проведения одновременных испытаний ИМС различных типов.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для радиационных испытаний целесообразно использование схемы включения ОУ в виде неинвертирующего усилителя напряжения с небольшим коэффициентом усиления и компаратора напряжения с входными резисторами. Применение источника входного синусоидального напряжения и цифрового осциллографа для регистрации формы сигналов позволяет контролировать работоспособность аналоговых устройств при радиационном воздействии, а также оценить изменение их основных параметров: коэффициента усиления, входного тока, напряжения смещения.

Предложенная блок-схема установки для измерений при радиационном облучении и методика регистрации одиночных событий позволяют отдельно зафиксировать кратковременные сбои и «зашелкивания» в ИМС.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Вологдин Э.Н., Лысенко А.П. Радиационные эффекты в интегральных микросхемах и методы испытаний изделий полупроводниковой электроники на радиационную стойкость: учеб. пособие по дисциплине «Радиационная стойкость изделий электронной техники». – М., 2002. – 46 с. – Режим доступа: <http://foet.miem.edu.ru>
- [2] Байков В.В. [и др.] Методические особенности радиационных испытаний операционных усилителей // Науч.-техн. сб. "Вопросы атомной науки и техники (ВАНТ), серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру". – 2002. – вып. 3. – С. 33–35.
- [3] Фигуров В.С. [и др.] Метод измерений коэффициента усиления операционных усилителей при радиационных испытаниях с использованием цифровых осциллографов // Науч.-техн. сб. "Вопросы атомной науки и техники (ВАНТ), серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру". – 2002. – вып. 3. – С. 31–32.
- [4] Фигуров В.С. [и др.] Исследование зависимости отклика операционных усилителей от длительности импульсного ионизирующего излучения // Науч.-техн. сб. "Вопросы атомной науки и техники (ВАНТ), серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру". – 2005. – вып. 3-4. – С. 57–61.
- [5] Combs W.E. [et al.] Radiation effects on the AT&T CBIC linear bipolar process // NSREC. – 1994. – P. 110–117.
- [6] Cano X. [et al.] Radiation hardness on very front-end for SPD // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 2005. – Vol. A 551. – P. 458–468.
- [7] Голутвин И.А. [и др.] Исследование радиационной стойкости интегральной схемы «АНОД». – Дубна, 2001. – 13 с. – (Сообщение Объединенного института ядерных исследований, P13-2001-152).
- [8] Полонников, Д.Е. Операционные усилители: Принципы построения, теория, схемотехника / Д.Е. Полонников. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 216 с.