



Государственный научный центр Российской Федерации –
Институт физики высоких энергий
Национального исследовательского центра
«Курчатовский институт»

ИФВЭ 2014–12
ОЭА

Ю.Д. Карпеков, М.М. Солдатов, В.И. Якимчук

**Модули формирования наносекундных импульсов
и логического отбора событий для экспериментов
ИФВЭ**

Протвино 2014

Аннотация

Карпеков Ю.Д., Солдатов М.М., Якимчук В.И. Модули формирования наносекундных импульсов и логического отбора событий для экспериментов ИФВЭ: Препринт ИФВЭ 2014–12. – Протвино, 2014. – 14 с., 9 рис., библиогр.: 9.

В настоящей работе описываются 4-х канальные модули формирователей наносекундных импульсов: Ф-04 и ФСП-04, а также логический модуль Л-02, содержащий две схемы 8-ми входовой логики. Модули предназначены для использования в экспериментах ИФВЭ.

Abstract

Karpekov Yu. D., Soldatov M.M., Yakimchuk V.I. Modules of shapers of nanosecond pulses and logical selection of events for IHEP experiments: Preprint 2014–12. – Protvino, 2014. –14 p., 9 figs., ref.: 9

The 4-channel modules of shapers of nanosecond pulses: Ф-04 and ФСП-04, as well as 8-input logic module Л-02 are described. The modules are designed for use in IHEP experiments.

Введение

При проведении экспериментальных исследований на ускорителе ИФВЭ активно используются различные типы формирователей наносекундных импульсов, которые преобразуют аналоговые сигналы с выходов детекторов частиц в стандартные логические импульсы. Наряду с формирователями в экспериментах ИФВЭ также широко применяются модули логической наносекундной электроники для отбора полезных физических событий в реальном времени эксперимента [1].

Для нормальной работы модулей наносекундной электроники на входы этих модулей должны подаваться стандартные логические импульсы с выходов формирователей, привязанные по времени к исследуемому событию. В частности, реальное временное разрешение схем совпадений и антисовпадений в модулях логической наносекундной электроники в сильной степени зависит от точности привязки по времени выходных импульсов формирователей к импульсам детекторов.

Для получения временной метки, жёстко связанной с выходным импульсом детектора, применяются различные методы временной привязки [2,3] из которых наибольшее распространение получили следующие методы:

- метод привязки к фронту импульса;
- метод пересечения нуля;
- метод следящего порога.

Заметим, что кроме перечисленных методов, известен также метод привязки к центру тяжести импульса, однако из-за сложности схемной реализации, на практике этот метод используется редко.

Схемотехнические решения, применяемые при реализации методов временной привязки импульсов, а также при создании логических устройств высокого временного

разрешения, отражены в многочисленных работах [4-6]. Однако, постоянное стремление к повышению точности временных измерений и современные достижения в развитии элементной базы микроэлектроники, стимулируют разработку новых схем формирователей наносекундных импульсов и модулей логической наносекундной электроники, обладающих высокими техническими параметрами. Актуальность таких разработок определяется также практической необходимостью проведения методических и плановых физических исследований на экспериментальных установках и стендах 70-ГэВ ускорителя ИФВЭ.

В настоящей работе описываются 4-х канальные модули формирователей наносекундных импульсов: Ф-04 и ФСП-04, а также логический модуль Л-02. Модуль Ф-04 работает с фиксированным порогом по методу временной привязки к фронту импульса детектора, а в модуле ФСП-04 используется метод следящего порога. Модуль Л-02 содержит две схемы 8-входовой логики, позволяющей выполнять логические функции OR или AND (по выбору).

Формирователь наносекундных импульсов Ф-04

Формирователь Ф-04 содержит четыре параллельных канала А,В,С,Д, работающих по методу привязки к фронту импульса детектора. Основным достоинством данного метода является возможность работы при большой частоте повторения входных импульсов и простота схемотехнической реализации. Формирователь Ф-04 рассчитан на работу с детекторами, имеющими небольшой динамический диапазон амплитуд выходных импульсов с малым временем нарастания фронта ($t_f \sim 2-5$ нс).

При большом динамическом диапазоне амплитуд выходных импульсов, импульсы большей амплитуды (A_1) достигают порога дискриминации (U_p) раньше чем A_2 , поэтому наблюдается разброс временной задержки (t_{z1}, t_{z2}) сигналов на выходе формирователя в пределах- t_f . (рис. 1).

Временная неопределенность (ΔT) срабатывания формирователя, связанная с шумами, определяется как: $\Delta T = A_{ш} / (dV/dt)$ при $t = T$, где dV/dt – производная в точке пересечения входного импульса с U_p . Кроме того, при низких порогах срабатывания и большом уровне шумов происходит перегрузка формирователей, а при высоких поро-

гах наблюдается сильная зависимость эффективного порога срабатывания от длительности входных импульсов [4].

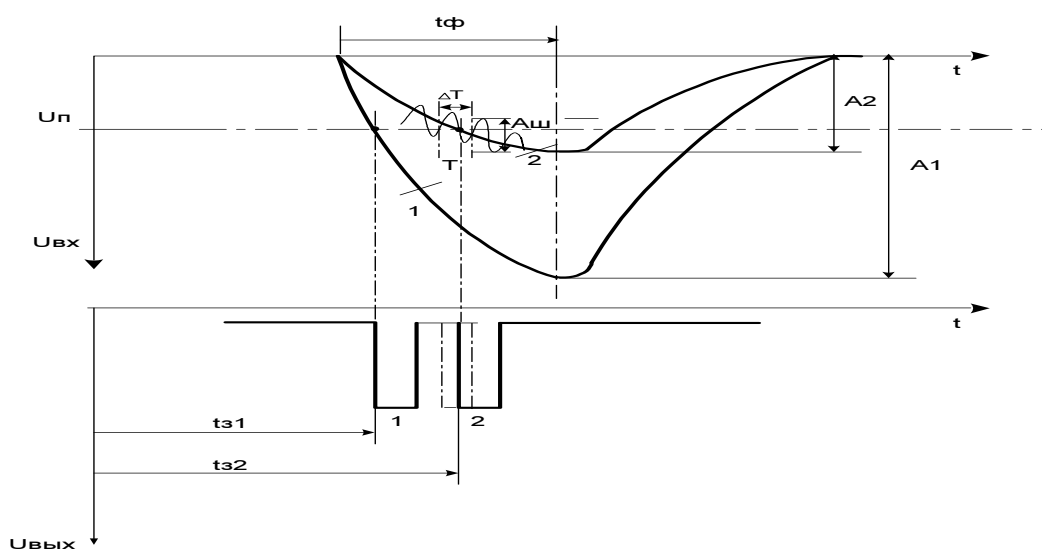


Рис.1. Временная неопределенность (t_{31} , t_{32}) срабатывания формирователя от амплитуды входных импульсов (A_1, A_2) и амплитуды шумов ($A_{ш}$) в методе привязки к переднему фронту импульса детектора.

С учетом выше сказанного, формирователь Ф-04 рассчитан на приём аналоговых сигналов с детекторов, работающих при больших пучковых нагрузках, с последующей обработкой сформированных сигналов в модулях наносекундной логики. Функциональная схема одного канала Ф-04 приведена на рис. 2.

В каждом канале формирователя содержится схема активного линейного разветвителя входного аналогового сигнала, что позволяет одновременно проводить временной и амплитудный анализ. Входной сигнал, подлежащий временному анализу, усиливается быстродействующим инвертирующим усилителем $У_2$ с коэффициентом усиления $K=2$. Одновременно входной сигнал поступает на вход линейного усилителя $У_1$ с коэффициентом усиления $K=1$. Для предохранения входных цепей формирователя от возможных электрических перегрузок, например, в случае пробоя ФЭУ, на входах Ф-04 содержатся элементы диодной защиты. Рабочий диапазон амплитуд входных сигналов составляет от -20 мВ до -800 мВ. Усилители $У_1$ и $У_2$ выполнены на интегральной мик-

росхеме AD8008, содержащей два операционных усилителя с полосой граничного усиления 650 МГц. Пороговый элемент формирователя - СА построен на основе быстродействующего ECL компаратора MAX9600. Временная задержка распространения сигнала в компараторе $\sim 0,5$ нс, а пороговая чувствительность ~ 5 мВ (при длительности входного сигнала $t=5$ нс).

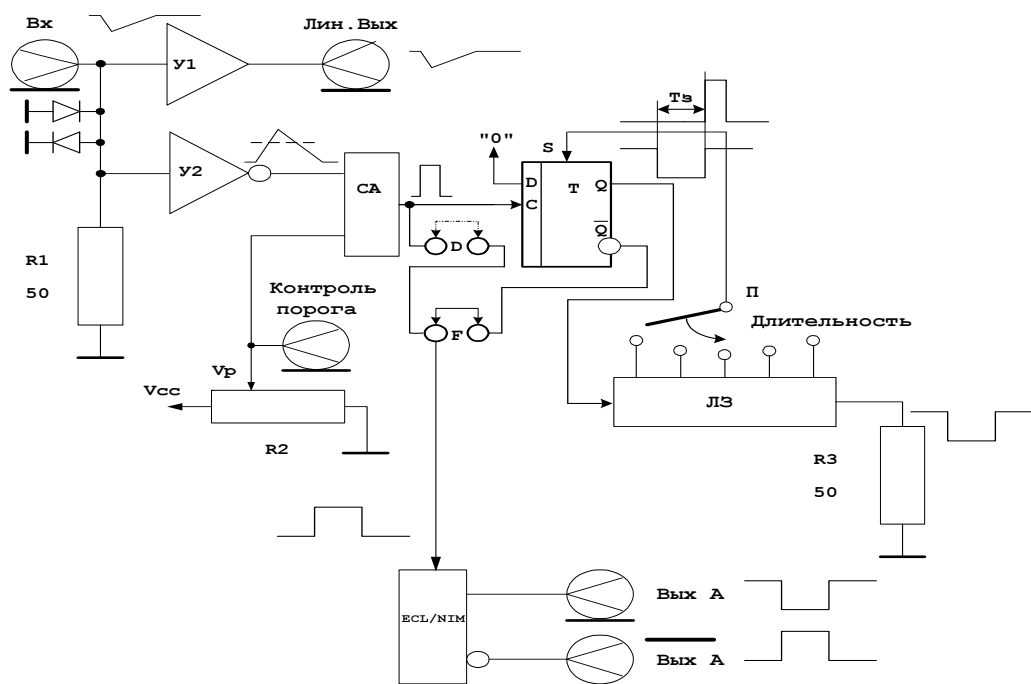


Рис. 2. Функциональная схема одного канала формирователя Ф-04.

Как отмечалось выше, временная привязка к выходным импульсам детектора осуществляется по переднему фронту в момент пересечения ими заданного порога (-20 мВ), устанавливаемого с помощью переменного резистора R2. Узел формирования длительности выходного импульса реализован на триггере Т и пассивной линии задержки ЛЗ с отводами. Длительность выходных импульсов регулируется в диапазоне от 5 нс до 40 нс путем коммутации отводов ЛЗ с помощью переключателя – П. Мёртвое время формирователя равно длительности сформированного импульса.

Конструктивно формирователь Ф-04 может быть выполнен в виде модуля одиначной ширины (рис. 9) системы СУММА [7] или МИСС [8]. В каждом канале фор-

мирователя расположены механические переключатели (джамперы), которые позволяют задавать различные режимы работы формирователя. В положении джамперов (D), формирователь работает в режиме амплитудного (интегрального) дискриминатора без формирования длительности выходных импульсов. В положении (F) осуществляется формирование выходных импульсов как по амплитуде, так и по длительности. Цифровая часть модуля выполнена на основе логических элементов ЕСЛ серии К500 и К1500. Расположение джамперов и логических элементов на печатной плате формирователя Ф-04 показано на рис. 3.

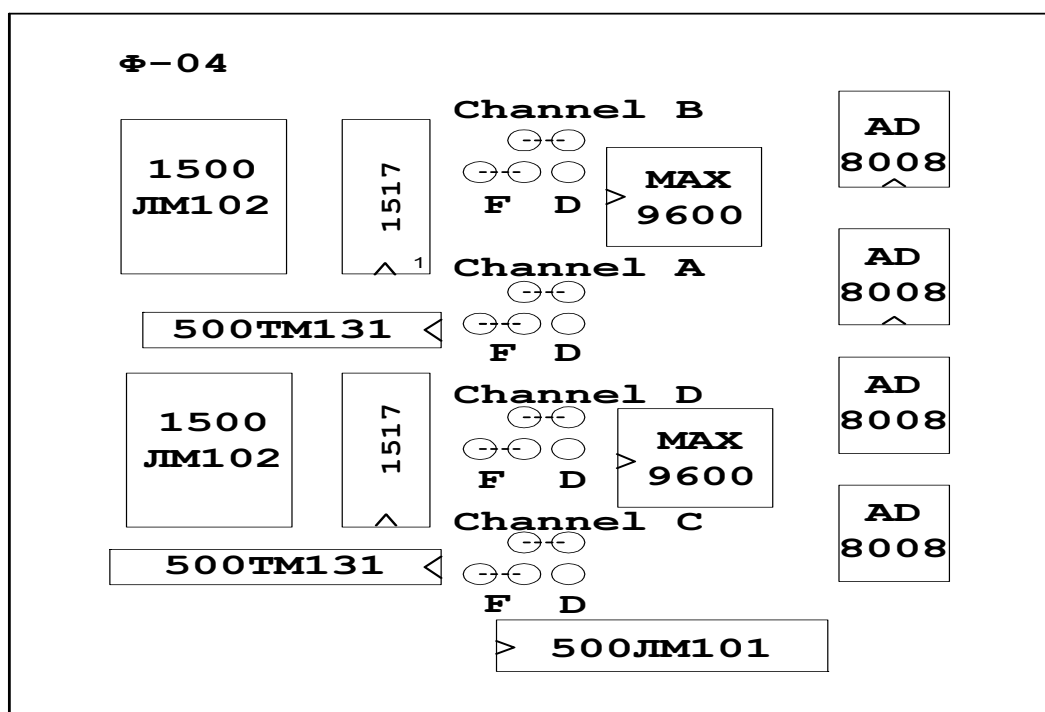


Рис. 3. Расположение джамперов на плате модуля Ф-04.

На передней панели модуля размещаются коаксиальные разъемы для входных и выходных линейных сигналов, а также разъемы для прямых и инверсных выходных логических сигналов, сформированных в стандарте NIM. Кроме того, на передней панели модуля расположен переключатель П для задания длительности выходных импульсов и коаксиальный разъем для контроля заданного порога V_p . Для удобства рабо-

ты с формирователем на передней панели Ф-04 также размещаются светодиодные индикаторы, отображающие срабатывание отдельных каналов в формирователе.

Формирователь наносекундных импульсов ФСП-04

Формирователь ФСП-04 содержит 4 параллельных канала, работающих по методу следящего порога. Достоинством данного метода является то, что он позволяет избавиться от “гуляния” импульсов на выходе формирователя при изменении амплитуд входных импульсов в широком динамическом диапазоне. При этом обязательным условием является инвариантность входных импульсов, т.е. импульсы должны иметь одинаковое время нарастания фронта- t_f независимо от их амплитуды.

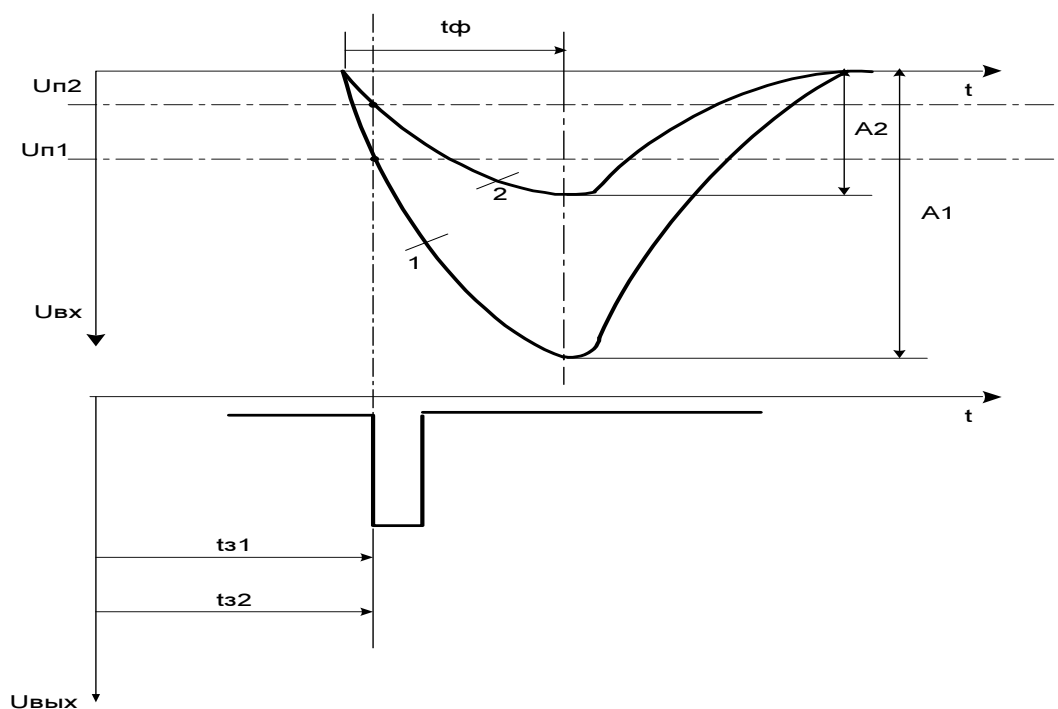


Рис. 4. Регулировка порога срабатывания ФСП пропорционально амплитуде входного импульса.

Сущность данного метода состоит в том, что при увеличении амплитуды импульса ($A1$) порог срабатывания формирователя ($Uп1$) повышается, а при уменьшении амплитуды ($A2$) порог ($Uп2$) снижается пропорционально предварительно заданной

фиксируемой части (фракции) его амплитуды (рис. 4.). Значение фракции выбирается из условия оптимального хронирования импульсов данного вида детектора. В результате временной разброс задержки появления сигналов на выходе формирователя практически отсутствует ($t_{з1} \approx t_{з2}$).

Функциональная схема и временные диаграммы, поясняющие принцип работы формирователя со следящим порогом приведены на рис. 5а и рис. 5б.

Как следует из рис. 5а входные импульсы поступают на прямой вход (А) дифференциального усилителя (ДУ) через линию задержки (ЛЗ), создавая на согласующем сопротивлении R_0 напряжение $U_A = U_{вх}$. Время задержки ЛЗ выбирается из условия: $t_з > t_ф$. На инверсный вход (В) усилителя входные импульсы поступают через резистивный делитель с коэффициентом деления $F = R_2 / (R_1 + R_2)$, создавая на сопротивлении R_2 напряжение $U_B = U_{вх} * F$. В результате амплитуды входных импульсов на инверсном входе усилителя ослабляются на определенную величину - фракцию пропорциональную F .

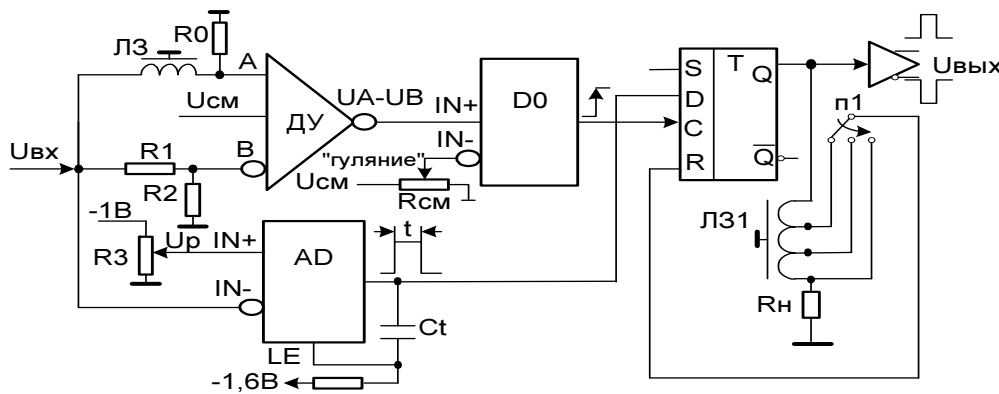


Рис. 5а. Функциональная схема формирователя со следящим порогом.

После суммирования напряжений U_A и U_B на выходе ДУ формируются разностные биполярные сигналы $U_A - U_B$, которые для детального рассмотрения временной диаграммы на рис. 5б изображены в увеличенном масштабе.

Пересечение нуля этими сигналами, происходит в момент времени $t_c = t_з + \Delta M$ и служит временной отметкой начала формирования выходного сигнала. В данном равенстве отрезок времени, соответствующий значению ΔM , не зависит от амплитуды

входных импульсов, имеющих одинаковое время $t\phi$. Это можно доказать, рассматривая геометрические соотношения сторон подобных (по углам) треугольников, вершины которых пересекаются в точке С: $\Delta ABC \sim \Delta KEC$, а $\Delta AMC \sim \Delta KDC$. Для вычисления стороны AM ΔAMC составляем пропорцию: $AM/DK=AC/KC=AB/EK$. Далее, после замены сторон подобных треугольников на параметры входных импульсов: $DK = t\phi-AM$, а $AB / EK = F*(U1-U2) / (1-F)* (U1-U2)$ находим, что $AM= F*t\phi$. Таким образом время $t_c = t_3 + F*t\phi$ не зависит от амплитуды входных импульсов, имеющих одинаковую длительность фронта $t\phi$.

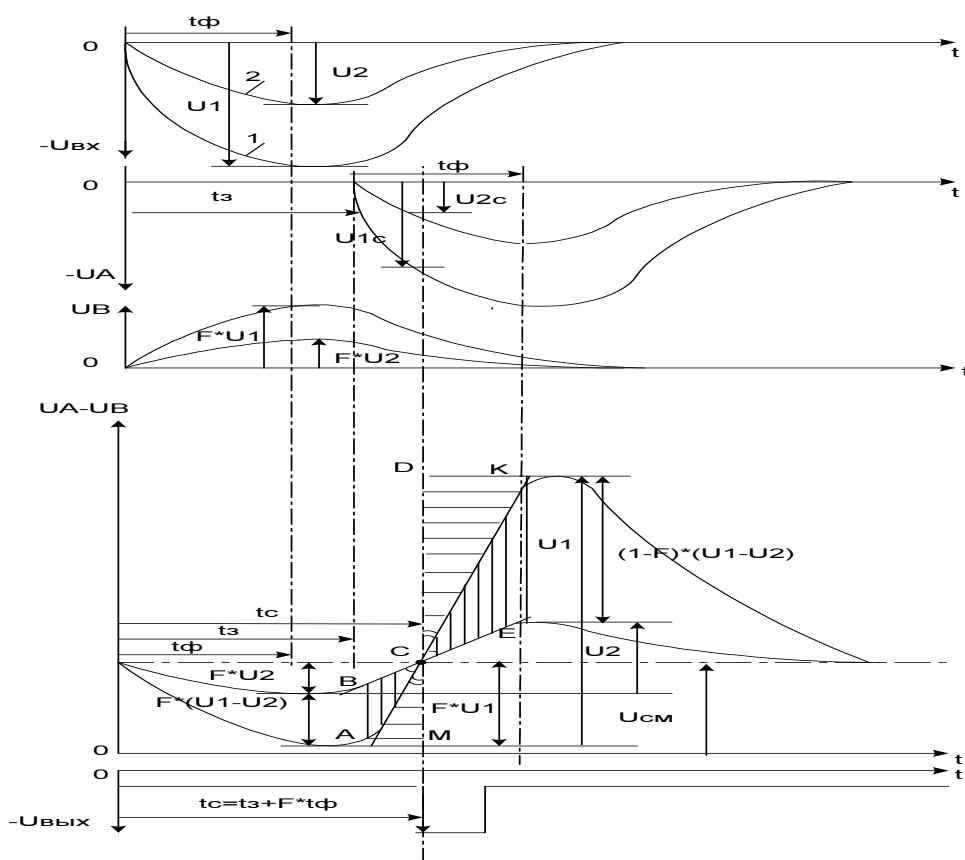


Рис.5б. Временные диаграммы работы формирователя со следящим порогом.

Рассмотренный метод временной привязки лёг в основу при разработке 4-х канального модуля формирователя ФСП-04 со следящим порогом. Привязка производится к 20% амплитуды входного импульса ($F=0,2$). В качестве ДУ в модуле используется низко шумящий дифференциальный усилитель, выполненный на ИС AD8138 с полосой граничного усиления 320 МГц. Для формирования сигнала, соответствующего мо-

менту времени t_c , биполярный сигнал с выхода ДУ поступает на вход схемы дискриминатора “нуля” - D0. Для повышения точности срабатывания D0 в момент пересечения нуля биполярным импульсом, в модуле ФСП-04 применяется быстродействующий компаратор на ИС MAX9600 с задержкой срабатывания $t_z \sim 500$ пс и высокой пороговой чувствительностью (~ 5 мВ). Для защиты срабатывания D0 от импульсных помех по “земле”, фиксация логического уровня схемой D0, производится при относительно высоком порого. Это достигается путём наложения на биполярный сигнал постоянного пьедестала ($U_{см}$), уровень которого регулируется потенциометром ($R_{см}$). Кроме того, для предотвращения ложных срабатываний формирователя ФСП-04 от шумовых импульсов ФЭУ, в модуле используется параллельный канал отбора на основе быстродействующего амплитудного дискриминатора (AD) выполненного также на ИС MAX9600, работающего в режиме одновибратора с регулируемым порогом (U_p) от 50 мВ до 1 В. При срабатывании одновибратора сигнал длительностью $t \sim 50$ нс поступает на вход D триггера T, который осуществляет формирование выходного сигнала по длительности. Включение триггера производится положительным перепадом с выхода схемы D0, а выключение сигналом с выхода управляемой линии задержки. При этом регулировка длительности выходного сигнала осуществляется путём коммутации переключателем П1 отводов линии задержки ЛЗ1, аналогично как в модуле Ф-04. Электрические параметры выходных сигналов модуля ФСП-04 соответствуют стандарту NIM.

Лабораторные испытания модуля ФСП-04 проводились по блок-схеме приведённой на рис. 6.

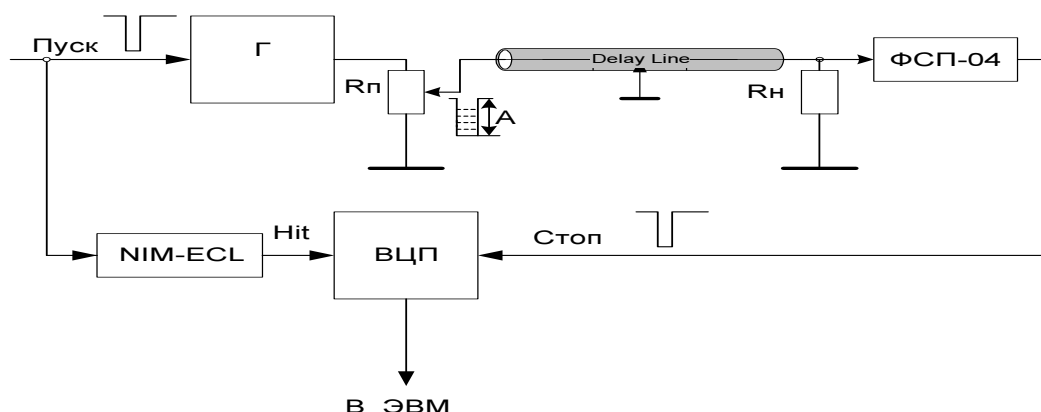


Рис. 6. Блок-схема тестирования модуля ФСП-04.

Схема содержит:

- ждущий генератор Г с регулируемой амплитудой (А) выходного импульса и временем нарастания фронта импульса $t_f = 2$ нс,
- время цифровой преобразователь ВЦП пикосекундного разрешения [9],
- кабельную линию задержки Delay Line,
- формирователь ФСП-04.

Запуск генератора осуществляется внешним сигналом Пуск, который одновременно поступает через схему преобразования уровней NIM-ECL на измерительный вход (Hit) модуля ВЦП и служит временной меткой начала измерения интервала времени между сигналом Пуск и сигналом Стоп, поступающим с выхода модуля ФСП-04. Эталонный интервал времени в данной схеме задаётся с помощью кабельной линии задержки (Delay Line). При разных амплитудах (А) сигнала на выходе генератора, изменяется временной сдвиг сигнала Стоп, который приводит к “гулянию” измеряемых интервалов времени относительно эталонного.

В ходе измерений набиралась статистика разброса задержки сигнала Стоп для 10-ти значений амплитуд (А) сигналов на выходе генератора. При этом для каждой заданной амплитуды сигнала проводилось 1000 циклов измерений. В процессе измерений кодированные данные с выхода ВЦП передавались в ЭВМ для их последующей обработки. Полученные результаты отображались в виде графика, показанного на рис. 7. Из данного рисунка видно, что при изменении амплитуды сигнала на выходе генератора в диапазоне от 50 мВ до 5 В, точность временной привязки сигнала Стоп на выходе модуля ФСП-04 не превышала ± 200 пс.

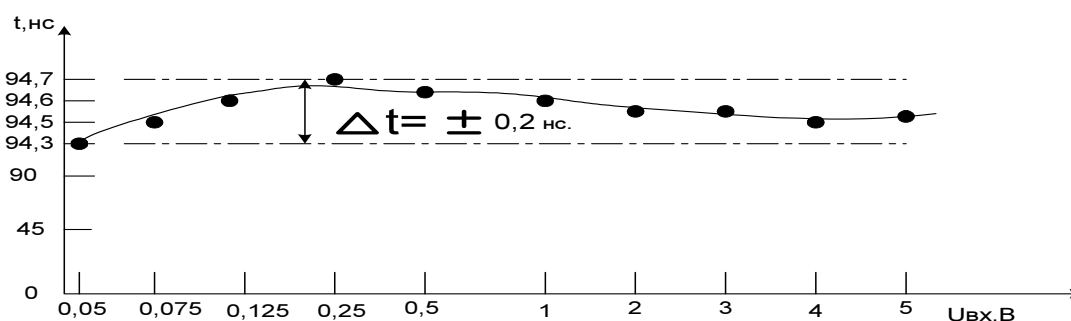


Рис. 7. Зависимость задержки сигнала Стоп на выходе модуля ФСП-04 от амплитуды импульса генератора при $F=0,2$.

Конструктивно ФСП-04 может быть выполнен в виде модуля двойной ширины системы СУММА или МИСС. На передней панели модуля в каждом канале размещаются коаксиальные разъемы для входных аналоговых сигналов, а также разъемы для прямых и инверсных выходных логических сигналов, сформированных в стандарте NIM. Дополнительно на лицевой панели модуля в каждом канале расположены по два разъема для подключения кабельной линии задержки (ЛЗ) входного импульса. Внешний вид модуля ФСП-04 показан на рис. 9.

Логический модуль Л-02

Модуль Л-02 содержит две независимые 8-ми входовые логические схемы, которые осуществляют по выбору выполнение логических функции AND или OR. Структурная схема одной 8-входовой логической схемы модуля Л-02 приведена на рис. 8.

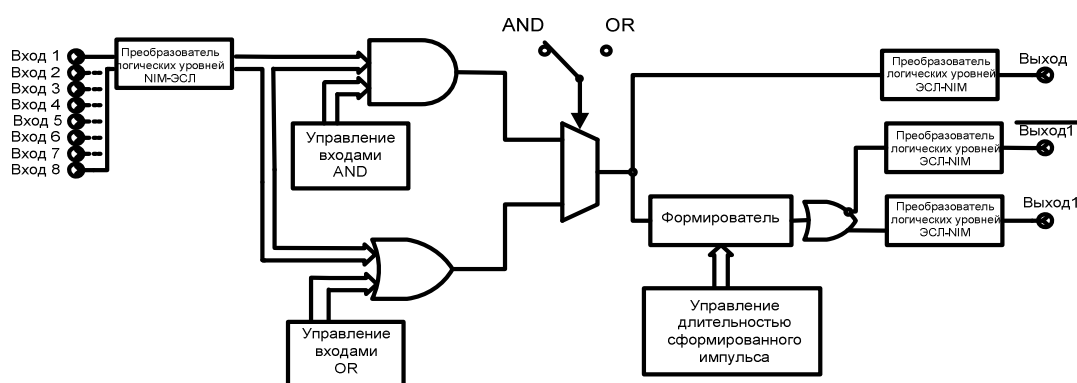


Рис. 8. Структурная схема 8-входовой логической схемы модуля Л-02.

Выбор необходимой логической функции, а также управление сигнальными входами, участвующими в выработке заданной функции, в каждой 8-ми входовой логической схеме производится с помощью соответствующих тумблеров на передней панели модуля. При этом необходимо отметить, что логические сигналы, поступающие на входы модуля Л-02, соответствуют стандарту ядерной электроники-NIM, в котором за уровень логического «0» принято напряжение $0V \pm 0,1V$, а за уровень логической «1» напряжение – $0,8 V \pm 0,1V$ на сопротивлении нагрузки $R_n = 50 \text{ Ом}$. В модуле Л-02, собранном на базе интегральных схем ЭСЛ ИС, уровню логического «0» соответствует напряжение $-1,6 V \pm 0,1V$, а уровню логической «1» соответствует напряжение $-0,8 V \pm 0,1V$ в положительной логике. Поэтому для согласования уровней входных логических сигналов с логическими уровнями сигналов принятыми в схемах ЭСЛ, во

входных цепях модуля Л-02 используются специальные схемы преобразования уровней НИМ-ЭСЛ, выполненные на высокочастотных транзисторах с полосой пропускания до 8 ГГц.

При реализации модулем Л-02 логической функции AND (совпадение входных сигналов), следует учитывать, что при отсутствии на входах модуля логических сигналов, на выходах схем преобразователей уровней НИМ-ЭСЛ устанавливается уровень напряжения логической «1» вместо логического «0», необходимого для выполнения функции AND схемами ЭСЛ ИС в положительной логике. Поэтому входы, на которые не подаются внешние логические сигналы, должны быть отключены соответствующими тумблерами на лицевой панели модуля Л-02 (рис. 9). При этом на неиспользуемых входах логических схем ЭСЛ ИС автоматически устанавливается уровень напряжения логического «0» ($-1,6 \text{ В} \pm 0,1 \text{ В}$).

При выполнении модулем Л-02 логической функции OR (суммирование входных сигналов) свободные входы (не подключенные к внешним источникам сигналов) не искажают результат выполнения функции OR.

На передней панели модуля Л=02 расположены по восемь входных разъёмов, одна пара выходных разъёмов для выдачи логических сигналов без формирования по длительности, а также две пары разъёмов для выдачи прямых и инверсных сигналов сформированных по длительности. Уровни входных и выходных сигналов – НИМ. Для получения неискажённых сигналов на прямых и инверсных выходах модуля Л-02 все выходные разъёмы должны быть нагружены на сопротивление $R_n=50 \text{ Ом}$.

Длительность сформированных импульсов регулируется переключателями на передней панели модуля и может быть установлена в диапазоне 10-85 нс с шагом регулировки 15 нс, но не менее длительности входного импульса. Задержка сигналов в схеме не превышает 7 нс. Наличие входных логических сигналов индицируется светодиодами. Длительность подсветки от единичного импульса $\sim 0,1 \text{ сек}$. Модуль разработан на основе интегральных схем ЕСЛ серии 1500. Конструктивно Л-02 может быть выполнен в виде модуля двойной ширины системы СУММА или МИСС. Внешний вид модуля Л-02 показан на рис. 9.

В заключении авторы выражают благодарность В.А. Сенько за ценные замечания и поддержку данной работы. Авторы также выражают глубокую признательность Г.И. Бритвичу за помощь при проведении тестовых испытаний модуля ФСП-04 на экспериментальном стенде 70-ГэВ ускорителя ИФВЭ.



Рис. 9. Внешний вид модулей: Ф-04, ФСП-04, Л-02.

Заключение

Разработанная и описанная в работе модульная аппаратура в настоящее время используется на многих физических экспериментальных установках и стендах ИФВЭ. Опыт эксплуатации аппаратуры показал ее достаточную надежность и удобство в работе.

Список литературы

- [1] Бушнин Ю.Б., Денисенко А.А., Дунайцев А.Ф. и др. Модули системы наносекундной логической электроники с управлением от ЭВМ. Препринт ИФВЭ 86-12, Серпухов, 1986.
- [2] Агаханян Т.М., Гаврилов Л.Е., Мищенко Б.Г. Основы наносекундной импульсной техники. М.,Атомиздат,1967.
- [3] Мелешко Е.А. Наносекундная электроника в экспериментальной физике. М.,Энергоатомиздат, 1987.с .60.
- [4] Балдин Б.Ю. Высокочувствительные формирователи сигналов фотоэлектронных умножителей. ПТЭ, №5, 1980.
- [5] Базиладзе С.Г. Быстродействующая ядерная электроника М.,Энергоиздат, 1982.с .69.
- [6] Валуев Н.П., Жихарев А.Н.Формирователь с точной временной привязкой. ПТЭ,1986.№ 3с.111.
- [7] Алфёрова О.И. и др.Препринт ИФВЭ 74-122,Серпухов,1974.
- [8] Ю.Б. Бушнин Ю.Б. и др. Препринт ИФВЭ 88-47, Серпухов, 1988.
- [9] Карпеков Ю.Д., Киселёв Ю.С., Сенько В.А. Препринт ИФВЭ 2011-20, Протвино, 2011.

Рукопись поступила 30 октября 2014 г.

Ю.Д. Карпеков, М.М. Солдатов, В.И. Якимчук.

Модули формирования наносекундных импульсов и логического отбора событий для экспериментов ИФВЭ.

Препринт отпечатан с оригинала-макета, подготовленного авторами.

Подписано к печати 10.11.2014 Формат 60 × 84/16. Цифровая печать.
Печ.л. 1,125. Уч.– изд.л. 1,536. Тираж 80. Заказ 18. Индекс 3649.

ФГБУ ГНЦ ИФВЭ НИЦ «Курчатовский институт»
142281, Московская область, город Протвино, площадь Науки, дом 1

www.ihep.ru; библиотека <http://web.ihep.su/library/pubs/all-w.htm>

Индекс 3649

П Р Е П Р И Н Т 2014-12,
ФГБУ ГНЦ ИФВЭ НИЦ «Курчатовский институт», 2014
