

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
"Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники"**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИНДУЦИРОВАННЫХ ПОМЕХ  
В ЛИНИЯХ СВЯЗИ**

2013

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
"Томский государственный университет систем управления и  
радиоэлектроники"  
(ТУСУР)**

**Кафедра сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники  
(СВЧиКР)**

Утверждаю  
Зав. кафедрой СВЧиКР  
\_\_\_\_\_ С.Н. Шарангович  
" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2013

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИНДУЦИРОВАННЫХ ПОМЕХ  
В ЛИНИЯХ СВЯЗИ**

Руководство к лабораторной работе для подготовки бакалавров по направлению  
210700.62 – Инфокоммуникационные технологии и системы связи, профиль –  
Системы радиосвязи и радиодоступа, дисциплина «Электромагнитная  
совместимость и управление радиочастотным спектром»

Разработчики:  
доцент каф. СВЧ  
В.А. Замотринский  
Новая редакция:  
проф. каф. СВЧиКР  
\_\_\_\_\_ А.А. Тихомиров

Дополнил:  
аспирант каф. СВЧиКР  
\_\_\_\_\_ А.Ю. Попков

2013

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ.....	4
2. ВВЕДЕНИЕ.....	4
3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ.....	4
3.1. Электрофизические параметры линии связи.....	4
3.2. Классификация линий связи.....	5
3.3. Индуцированные помехи в коротких линиях за счет электрической связи.....	8
3.4. Электрические параметры линий связи двухсторонней печатной платы.....	10
4. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ.....	11
5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ.....	13
6. УКАЗАНИЯ ДЛЯ РАБОТЫ С ПРИБОРАМИ AGILENT.....	14
6.1. Осциллограф Agilent MSO7104B.....	14
6.2. Генератор сигналов специальной и произвольной формы Agilent 33522A.....	16
7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	18
8. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	19

## 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью данной работы является исследование индуцированных помех в соседних проводниках печатной платы, которые возникают за счет электромагнитных связей при прохождении импульсов электрического тока.

## 2. ВВЕДЕНИЕ

Одной из причин возникновения внутриаппаратурных помех в радиоэлектронных устройствах являются индуцированные помехи (перекрестные наводки) между рядом расположенными линиями связи. Уровень таких помех зависит от конструкции устройства, которая определяется взаимным расположением линий связи, их конфигурацией, экранированием и т. п. Эти помехи могут приводить к неустойчивой работе всего устройства и, в частности, к самовозбуждению усилителей, ложному срабатыванию аналого-цифровых преобразователей, устройств синхронизации и т.п. При проектировании и конструировании радиоэлектронной аппаратуры с учетом внутриаппаратурной электромагнитной совместимости важным является оценка уровня возникающих индуцированных помех и, при необходимости, уменьшение их уровня до приемлемого значения за счет конструктивных решений [1-3].

## 3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

### 3.1. Электрофизические параметры линии связи

Одиночная линия связи характеризуется следующими распределенными параметрами: собственные емкость  $C_0$  [Ф/м] и индуктивность  $L_0$  [Гн/м]; сопротивление проводника  $R_0$  [Ом/м] и проводимость изоляции  $G_0$  [См/м], а также электрофизическими параметрами: волновое сопротивление линии  $Z_0$  [Ом]; комплексная постоянная распространения  $\gamma = \alpha + i\beta$  [м<sup>-1</sup>], коэффициент затухания  $\alpha = \alpha_R + \alpha_{\text{п}}$  ( $\alpha_R$  – потери в проводнике,  $\alpha_G$  – потери в диэлектрике), фазовая постоянная  $\beta$ ; фазовая скорость распространения  $v_{\text{ф}} = 1/\sqrt{\mu\epsilon}$  [м/с]; удельное время задержки распространения сигнала в линии  $t_{\text{з.п.л.}} = 1/v_{\text{ф}} = \sqrt{\mu\epsilon}$  [с/м]; магнитная  $\mu = \mu_r\mu_0$

[Гн/м] и диэлектрическая  $\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$  [Ф/м] проницаемости среды [1].

Для ненагруженной линии связи с учетом значений диэлектрической проницаемости вакуума  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м и магнитной проницаемости  $\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6}$  Гн/м значение удельного времени задержки распространения равно

$$t_{з.р.л} = 3,33 \sqrt{\mu_r \varepsilon_{эф}}, \text{ нс/м}, \quad (1)$$

а для нагруженной линии связи дополнительно увеличивается

$$t'_{з.р.л} = t_{з.р.л} \sqrt{1 + C_H / C_0 l}, \quad (2)$$

где  $\mu_r$  – относительная магнитная проницаемость среды;  $\varepsilon_{эф}$  – эффективное значение относительной диэлектрической проницаемости среды (для большинства диэлектриков  $\mu_r = 1$ ,  $\varepsilon_{эф} = 5 \dots 8$ );  $C_H$  – емкость нагрузки;  $l$  – геометрическая длина линии. Для коротких линий связи, каковыми являются токонесущие проводники печатной платы, обычно пренебрегают потерями в проводнике ( $R_0 = 0$ ,  $\alpha_R = 0$ ) и диэлектрике ( $G_0 = 0$ ,  $\alpha_G = 0$ ), т. е. считают, что электрофизические параметры линии носят чисто реактивный характер. В этом случае волновое сопротивление линии определяется из соотношения  $Z_0 = \sqrt{L_0 / C_0}$ .

### 3.2. Классификации линий связи

При анализе быстродействия радиоэлектронной аппаратуры линии связи подразделяются на электрически "короткие" и "длинные". При этом сопоставляются время задержки  $T_з = l \cdot t_{з.р.л}$  распространения электромагнитной волны вдоль линии связи, имеющей длину  $l$ , и время нарастания переднего фронта сигнала  $t_\phi$ . В частности для цифровых линий передачи данных таким временем является время переключения микросхемы из состояния логического нуля ("0") в состояние логической "1" –  $t^{0,1}$ , или из "1" в "0" –  $t^{1,0}$ .

Большинство массовых соединений электрорадиоэлементов на печатной плате выполняется несогласованными неэкранированными проводниками и относится к "коротким" линиям связи. Для импульсных сигналов электрически короткой считают такую линию, в которой

$$t_\phi > 4T_з. \quad (3)$$

Для сигналов, близких к синусоидальным (квазигармоническим), условием электрически короткой линии является  $l \ll \lambda$ , где  $\lambda$  – длина волны в линии. В случае электрически длинных линий связи знаки вышеприведенных неравенств меняются на обратные.

На практике, как правило, электрически короткими являются проводники на печатных платах; длинными линиями являются соединения между панелями, блоками, стойками и т. п. На эквивалентных схемах электрически короткие линии замещают сначала схемами с распределенными параметрами, затем – схемами с сосредоточенными индуктивностями и емкостями (рис. 1, б и в).

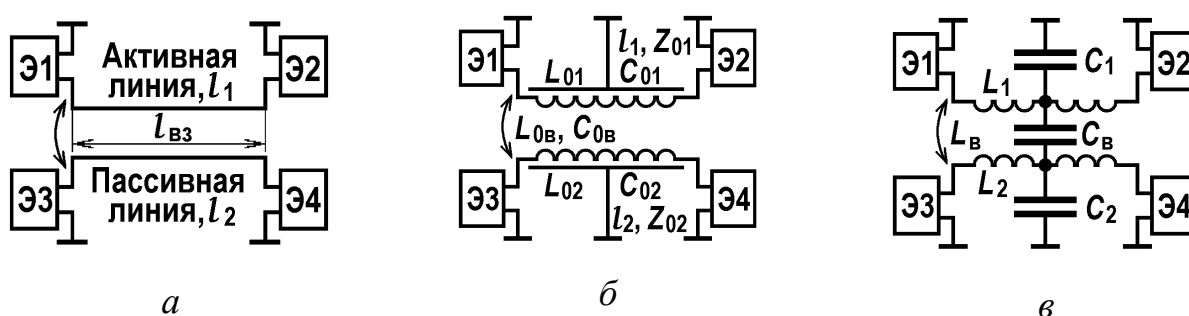


Рис. 1. Схема взаимодействующих линий связи с распределенными параметрами (а), ее эквивалентная схема (б) и эквивалентная схема линии с сосредоточенными параметрами (в). Э1, Э2, Э3, Э4 – активные элементы (микросхемы).

При анализе индуцированных помех одна из линий связи считается активной, а вторая – пассивной, т. е. предполагается, что в первой линии управляющий элемент Э1 инициирует положительный или отрицательный перепад напряжения, который передается на воспринимающий элемент Э2. Протекающий при этом в активной линии ток за счет электромагнитной связи будет наводить в близко расположенной второй линии помеху. В общем случае для определения переходных процессов в двух взаимодействующих линиях связи, необходимо решать дифференциальные уравнения в частных производных (телеграфные уравнения) с учетом соответствующих граничных и начальных условий.

Для упрощения анализа сосредоточенные значения емкостей и индуктивностей на эквивалентной схеме (рис. 1, в) определяются из следующих соотношений:  $C_1 = C_{01} \cdot l_1$ ;  $L_1 = L_{01} \cdot l_1$ ;  $C_2 = C_{02} \cdot l_2$ ;  $L_2 = L_{02} \cdot l_2$ ;  $C_в = C_{0в} \cdot l_{вз}$ ;  $L_в = L_{0в} \cdot l_{вз}$ . Здесь

цифры в индексах определяют принадлежность к активной – 1, или пассивной – 2 линиям,  $C_{0в}$  и  $L_{0в}$  – значения взаимных емкости и индуктивности между линиями,  $l_{вз}$  – длина участка взаимодействия линий связи ( $l_{вз} \leq l_1, l_2$ ). При оценке электромагнитной связи используют значение коэффициента связи, который для индуктивной и емкостной связи оцениваются соответствующими значениями  $k_L = L_{в} / \sqrt{L_1 L_2}$ ;  $k_C = C_{в} / \sqrt{C_1 C_2}$ . В случае однородных сред  $k_L = k_C$ .

Омическими потерями в проводниках и диэлектриках в коротких линиях обычно пренебрегают.

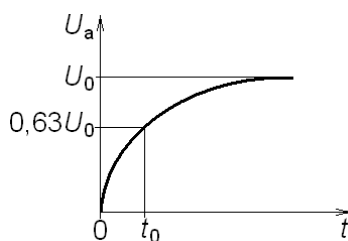
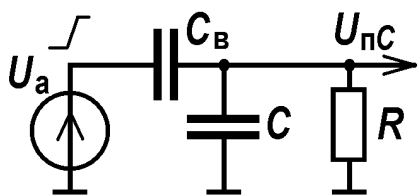
В зависимости от соотношения волнового сопротивления линии  $Z_0$  и сопротивления нагрузки  $Z_{н}$ , которым является входное сопротивление активных элементов, могут встретиться три случая:

- 1)  $|Z_{н}| \gg Z_0$ , в линии преобладает энергия магнитного поля (индуктивный характер линии);
- 2)  $|Z_{н}| \ll Z_0$ , в линии преобладает энергия электрического поля (емкостной характер линии);
- 3)  $|Z_{н}| = Z_0$ , энергии электрического и магнитного полей равны, линия согласована с нагрузкой.

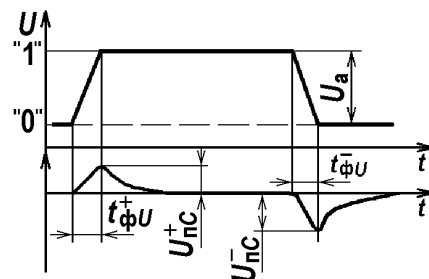
На основании предположения о слабой взаимосвязи линий ( $k_L, k_C \ll 1$ ) при анализе схемы рис. 1 можно считать, что переходные процессы в активной линии не зависят от переходных процессов формирования помехи в пассивной линии. При четко выраженном индуктивном характере линии связи, можно пренебречь емкостной наведенной помехой (через  $C_{0в}$ ) и, наоборот, при емкостном характере связи – пренебречь индуктивной наводкой (через  $L_{0в}$ ). В промежуточных случаях анализ схемы существенно усложняется. Для микросхем ТТЛ логики, размещаемых на печатных платах и работающих с небольшими токами, наиболее типичны линии связи емкостного характера.

### 3.3. Индуцированные помехи в коротких линиях за счет электрической (емкостной) связи

Будем считать, что линия связи, соединяющая элементы Э1 и Э2 на рис. 1, является источником помехи (активная), а линия, соединяющая элементы Э3 и Э4 – рецептором помехи (пассивная). Предполагая, что между активной и пассивной линиями преобладает емкостной характер связи ( $L_{\text{в}} = 0$ ), а также пренебрегая собственными реактивностями активной цепи ( $L_1 = C_1 = 0$ ), эквивалентную схему, представленную на рис. 1, в, можно упростить до схемы, представленной на рис. 2. При этом также предполагается, что величина сопротивления  $R$  определяется как эквивалентное значение параллельно соединенных входных сопротивлений элементов Э3 и Э4:  $R = R_{\text{Э3}}R_{\text{Э4}}/(R_{\text{Э3}} + R_{\text{Э4}})$ , а величина емкости  $C$ , как параллельное соединение  $C_2$  и емкости монтажа  $C_{\text{сх}}$ :  $C = C_2 + C_{\text{сх}}$ .



а)



б)

Рис. 2. Упрощенная эквивалентная схема при электрической связи.

Рис. 3. а) – описание переднего фронта исходного импульса; б) – перепады напряжения в активной линии и возникающие индуцированные помехи.

Задачей является определение величины напряжения помехи  $U_{\text{пс}}$ , наводимой на входных сопротивлениях элементов Э3 и Э4 (рис. 1), за счет емкостной связи между соседними парами проводников.

Для коротких линий связи дифференциальные уравнения в частных производных упрощаются до обычных дифференциальных уравнений, описывающих временной характер изменения напряжения. Уравнение, описывающее процесс наведения емкостной помехи, имеет вид



$$C_B \frac{d(U_a - U_{пс})}{dt} = \frac{U_{пс}}{R} + C \frac{dU_{пс}}{dt}. \quad (4)$$

Решая задачу определения  $U_{пс}$  через  $U_a$  операторным методом, получим

$$U_{пс}(p) = U_a(p) \frac{p}{p + 1/\tau_2}, \quad (5)$$

где  $\tau_2 = R(C_B + C)$  – постоянная времени цепи, изображенной на рис. 2. В предположении закона нарастания переднего фронта импульса в активной линии в форме, изображенной на рис. рис. 3, а) и описываемой выражением

$$U_a(t) = U_0 \left( 1 - e^{-t/t_0} \right), \quad (6)$$

где  $t_0$  соответствует условию  $U_a(t_0) = 0,63U_0$  и связано с длительностью фронта  $\tau_{\phi U}^+$  (или  $t^{0,1}$ ), определяемому как интервал времени, в течение которого  $U_a(t)$  изменяется от значений  $0,1U_0$  до  $0,9U_0$ , соотношением

$$\tau_{\phi U}^+ = 2,2t_0. \quad (7)$$

Согласно преобразованию Лапласа выражению  $U_a(t)$  соответствует операторное напряжение

$$U_a(p) = \frac{U_0}{t_0 p (p + 1/t_0)}. \quad (8)$$

Подставляя  $U_a(p)$  в выражение (5) для  $U_{пс}(p)$  и переходя к оригиналу  $U_{пс}(t)$ , получим

$$U_{пс}(p) = \frac{U_0 \tau_2}{t_0 - \tau_2} \left( e^{-t/t_0} - e^{t/\tau_2} \right). \quad (9)$$

В зависимости от соотношения между  $t_0$  и  $\tau_2$ ,  $U_{пс}(t)$  может иметь различную форму. Определим момент времени  $t_m$ , при котором  $U_{пс}(t_m)$  – максимально. Решая

уравнение  $\frac{dU_{пс}(t)}{dt} = 0$ , получим

$$t_m = \frac{t_0 \tau_2 \ln(t_0/\tau_2)}{t_0 - \tau_2}. \quad (10)$$

Если  $t_0 \gg \tau_2$ , то

$$t_m \approx \tau_2 \ln(t_0/\tau_2); \quad U_{\text{пс}}(t_m) \approx U_0 \frac{\tau_2}{t_0}. \quad (11)$$

В общем случае наведенная индуцированная емкостная помеха  $U_{\text{пс}}$  совпадает по знаку со знаком фронта импульса в активной линии. На рис. 3 б) показаны эпюры напряжения в активной линии при переключении элемента ТТЛ из логического состояния "0" в "1" и обратно и образующиеся на входах элементов Э3 и Э4 пассивной линии скачки напряжения емкостной помехи положительной  $U_{\text{пс}}^+$  и отрицательной полярности  $U_{\text{пс}}^-$ . При  $t = t_{\text{ф}}$  помеха будет достигать максимального значения.

Так как длительности переднего и заднего фронтов в активной линии обычно разнятся, то амплитуда положительной и отрицательной наводимой помехи будет разной.

### 3.4. Электрические параметры линий связи двухсторонней печатной платы

Поперечное сечение двухсторонней печатной платы показано на рис. 4.

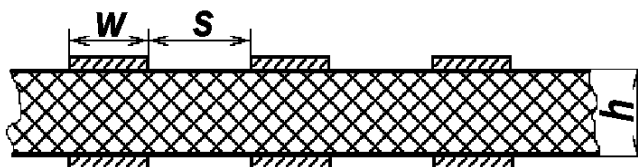


Рис. 4. Двухсторонняя печатная плата.

В данной работе верхние проводники используются как сигнальные, нижние – как земляные. Для такого включения электрические параметры таких линий определяются следующими приближенными соотношениями [2, 3]:

1) Погонная емкость линии, при  $w/h \leq 1$

$$C_0 = \frac{8,85 \varepsilon_{\text{эф}} \pi}{\ln(4h/w)}, \quad \text{пФ/м} \quad (12)$$

где  $\varepsilon_{\text{эф}} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2\sqrt{1 + 5h/w}}$  – эффективная диэлектрическая проницаемость.

2) Фазовая скорость распространения сигнала в линии

$$v_{\phi} = 3 \cdot 10^8 / \sqrt{\epsilon_{\text{эф}}}, \text{ м/с.} \quad (13)$$

3) Волновое сопротивление линии

$$Z_0 = \sqrt{L_0/C_0} = 1/v_{\phi} \cdot C_0, \text{ Ом.} \quad (14)$$

При известных значениях  $Z_0$  и  $C_0$  из соотношения (14) может быть также определена погонная индуктивность  $L_0$ .

4) Погонная взаимная емкость  $C_{0в}$  (без учета земляных проводников) определяется по методу комфортажных отображений [2]

$$C_{0в} = \frac{17,7\epsilon_{\text{эф}}}{K_1(k)}, \text{ пФ/м,}$$

где  $k = \sqrt{1 - (k')^2}$ ;  $k' = \frac{w}{w+s}$ ;  $w$  – ширина проводника;  $s$  – расстояние между ближайшими краями проводников (см. рис. 4);

ними краями проводников (см. рис. 4);

$$K_1(k) = \pi / \ln \left( 2 \frac{1 + \sqrt{k'}}{1 - \sqrt{k'}} \right); \quad k^2 \leq 0,5;$$

$$K_1(k) = 1 / \pi \ln \left( 2 \frac{1 + \sqrt{k'}}{1 - \sqrt{k'}} \right); \quad k^2 \geq 0,5.$$

#### 4. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 5.



Рис.5. Схема экспериментальной установки: Г – генератор сигналов Agilent 33522A; ОС – осциллограф Agilent MSO7104B; Р – разъем; П – переключатель на 5 положений

Объектом исследования является печатная плата на стеклотекстолитовой подложке компланарного типа с параллельными печатными проводниками, расположенными по обе стороны платы, так что попарно образуется шестнадцать линий передач. К одной из них, активной (26-ой по нумерации на плате) подводится от генератора Agilent 33522A исходный импульс с формой, близкой к прямоугольной. С помощью переключателя "П" осциллограф может быть подключен к этой линии (положение переключателя 1), либо к одной из четырех соседних с ней, пассивных линий (положения 2÷5). С помощью набора разъемов "Р" линии могут быть нагружены на сопротивления  $R_1 \div R_5$ , заменяющие входные и выходные сопротивления активных элементов реальной схемы. Так для ИМС распространенной серии К-155 ТТЛ типа при логическом "0"  $R_{вх} = 100 \text{ Ом}$ ,  $R_{вых} = 10 \text{ Ом}$ , при логической "1"  $R_{вх} = \infty$ ,  $R_{вых} = 100 \text{ Ом}$ . Набор разъемов с вмонтированными в них резисторами позволяет реализовать следующие варианты нагрузок (табл. 1).

Таблица 1.

Цвет разъема	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$
белый	100	100	10	$\infty$	100
белый	100	100	100	100	100
желтый	100	0	100	$\infty$	10

*Примечание:*

При отключении разъема все  $R_i = \infty$ .

На генераторе рекомендуется установить длительность импульсов  $0,1 \div 0,3$  мкс, частоту повторения  $10 \div 100$  кГц, амплитуду исходных импульсов  $1 \div 2$  В. длительность переднего и заднего фронтов импульса генератора различны. Это позволяет исследовать влияние длительности фронта исходного импульса на величину наведенного импульса. Принять  $w = 1$  мм,  $s = 2$  мм,  $l = 90$  мм,  $h = 1,5$  мм. Для стеклотекстолита  $\epsilon_r = 6$ .

## 5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

5.1. Изучите описание работы, ответьте на контрольные вопросы, получите от преподавателя допуск на выполнение работы.

5.2. Соберите схему рис. 5. Установите рекомендуемые параметры исходного импульса и измерьте его амплитуду и длительности переднего и заднего фронтов по уровню  $0,63(t_0)$ , рассчитайте  $\tau_{\Phi U}^+$  по (7).

5.3. Убедитесь, что исследуемые линии – электрически короткие по соотношению (3), рассчитав  $T_3$ .

5.4. Определите характер линии связи (емкостной, индуктивный или согласованный). Для этого рассчитайте  $Z_0$  и сравните его с сопротивлениями нагрузок  $Z_1$  из табл. 1 для своего варианта.

5.5. Для вторичных (пассивных) линий, указанных преподавателем, рассчитайте взаимные емкости  $C_{0в}$  с первичной (активной) линией и амплитуды наведенных импульсов для переднего и заднего фронтов исходного импульса. При расчете емкостей учтите, что паразитная емкость между контактами и подводящими проводами переключателя составляет  $5 \div 6$  пФ. Для разомкнутых линий наведенный импульс считайте по схеме емкостного делителя (см. рис.2).

5.6. Сохраните на флэш-диск полученные изображения исходного и наведенного импульсов и измерьте их амплитуду и длительность.

5.7. Сравните теоретические и экспериментальные результаты и сделайте выводы о влиянии расстояния между линиями и величины нагрузки на амплитуду и форму наведенных импульсов.

5.8. Для ИМС серии К-155 (напряжение логических "0" и "1"  $U^0 \leq 0,4$  В и  $U^1 \geq 2,4$  В) оцените амплитуду исходного импульса в первичной линии, вызывающего ложное срабатывание логических элементов в пассивной линии. Сделайте вывод о помехоустойчивости данной линии к перекрестным наводкам.

## 6. Указания для работы с приборами Agilent

### 6.1. Осциллограф Agilent MSO7104B

На рис. показана передняя панель четырехканального осциллографа Agilent MSO7104B с обозначением его средств управления.

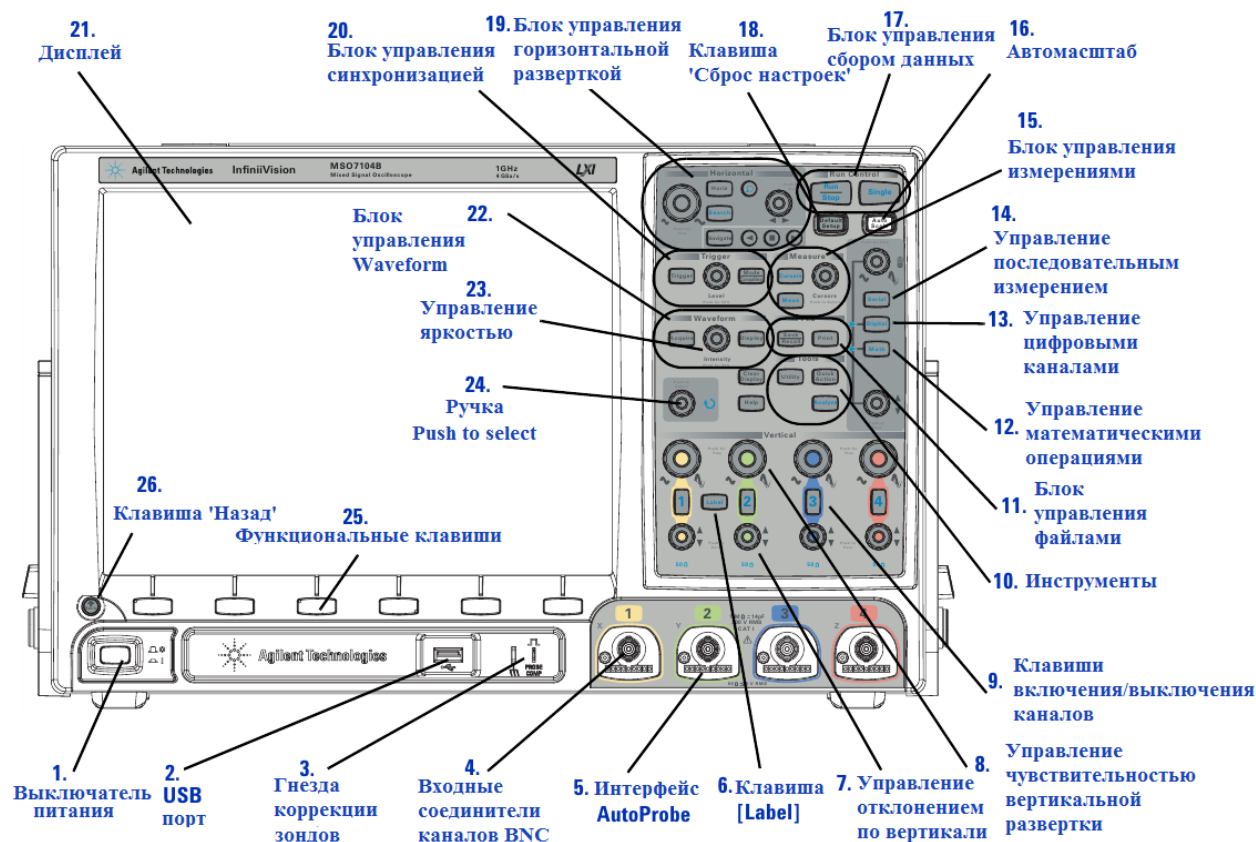


Рис. Передняя панель осциллографа Agilent MSO7104B

Перед началом работы с осциллографом внимательно изучите главу 1 руководства для пользователя [6].

Измерения с помощью осциллографа проводить по следующему алгоритму:

1. Для отображения более точных результатов порт синхронизации осциллографа необходимо соединить кабелем с портом синхронизации генератора сигналов.
2. Соединить осциллограф и исследуемое устройство с помощью специальных кабелей с зондами. На первый порт подключить входной порт устройства, на второй – выходной порт.
3. Для удобства наблюдения результатов нажмите клавишу автомасштаб (16).

4. Для того, чтобы снизить уровень шума в составе измеряемого сигнала применяется режим усреднения. Этот режим позволяет усреднять многократные регистрации и повысить разрешение по вертикали при всех значениях коэффициента развертки.

Кратность усреднения можно установить от 1 до 65536 степенями, соответствующими степеням числа 2. Чем выше кратность усреднения, тем медленнее отображаемая на экране осциллограмма реагирует на изменения формы сигнала. Поэтому обычно выбирается компромисс между скоростью реакции и степенью снижения уровня шумов.

Чтобы применить режим усреднения необходимо нажать клавишу **Acquire** на блоке управления **Waveform**, далее нажать первую функциональную клавишу **Acq Mode**, пока не будет выбран режим усреднения. Для установки кратности режима усреднения нажмите функциональную клавишу **#Avgs** и вращайте ручку **Push to select** до тех пор, пока шумы станут едва различимы.

5. Для измерения данных нужно воспользоваться курсорными измерениями. Курсоры представляют собой горизонтальные и вертикальные маркеры, которые указывают значения по оси X (обычно это время) и по оси Y (обычно это амплитуда напряжения) у выбранного источника осциллограммы. Чтобы начать курсорные измерения необходимо нажать клавишу **Cursors** на блоке управления измерениями (15). При включении курсоров эта клавиша подсвечивается. Курсорами можно управлять ручкой **Cursors** на этом же блоке. Чтобы отключить курсорные измерения необходимо снова нажать клавишу **Cursors**, при этом она перестанет подсвечиваться.

Для выполнения измерений нажмите функциональную клавишу **Source** и выберете канал измерений, к которому подключен выход макета. Для выполнения измерений воспользуйтесь третьей функциональной клавишей для выбора маркера:

**X1** – левый курсор измерения горизонтальной шкалы;

**X2** – правый курсор измерения горизонтальной шкалы;

**Y1** – нижний курсор измерения вертикальной шкалы;

**Y2** – верхний курсор измерений вертикальной шкалы;

**X1 X2 linked** – управление левым и правым курсорами горизонтальной шкалы одновременно;

**Y1 Y2 linked** – управление верхним и нижним курсорами вертикальной шкалы одновременно.

Для переключения между курсорами также можно воспользоваться ручкой **Cursors**, нажав ее один раз для того, чтобы открылось меню. Далее выбрать нужный режим вращением ручки и повторным нажатием подтвердить выбор.

б. Для сохранения измеряемой осциллограммы:

а. вставьте флэш-диск в USB-порт (2) осциллографа (формат файловой системы должен быть FAT 32);

б. нажмите клавишу **Save/Recall** на блоке управления файлами (11);

в. нажмите функциональную клавишу **Save**. В поле «**Save to file**» над функциональной клавишей **Save** будет отображаться имя файла. Чтобы изменить его нажмите функциональную клавишу **File Name**. Вращением ручки **Push to Select** выберете нужный символ, а затем нажмите ручку, чтобы подтвердить выбор. Чтобы изменить символ в пределах имени можно выбрать нужный символ путем нажатия ручки **Push to Select**;

г. с помощью функциональной клавиши **Format** выберете формат файла;

д. нажмите функциональную клавишу **Press to Save**.

## 6.2. Генератор сигналов специальной и произвольной формы Agilent 33522A

Компоненты лицевой панели и элементы дисплея обозначены на рис. и рис.



Рис. компоненты лицевой панели генератора сигналов Agilent 33522A

1. USB порт;

2. Выключатель питания;



3. Дисплей;
4. Функциональные клавиши для операций с меню;
5. Клавиши фиксированных функций;
6. Клавиша настройки параметров синхронизации;
7. Разъем синхронизации;
8. Блок цифровой клавиатуры;
9. Выходные соединители каналов 1 и 2;
10. Поворотная ручка и кнопки со стрелками для управления курсором.

*Примечание:*

Нажмите и удерживайте любую клавишу на лицевой панели, чтобы получить контекстную справку.

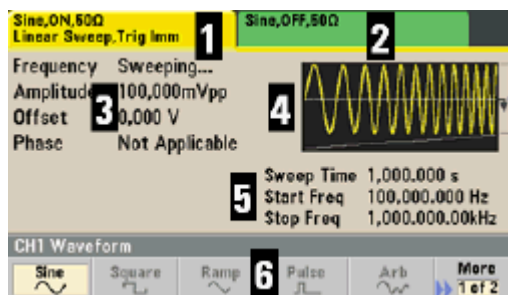


Рис. Элементы дисплея на передней панели

1. Информация по каналу 1;
2. Информация по каналу 2;
3. Параметры сигнала;
4. Область отображения формы сигнала;
5. Параметры развертки и пакетного сигнала;
6. Наименования функциональных клавиш.

### **Ввод численных значений**

Численные значения вводятся двумя разными способами:

1. С помощью поворотной ручки и стрелками для изменения индуцированного значения.
2. С помощью блока цифровой клавиатуры и функциональных клавиш, отвечающих за размерность вводимого параметра сигнала.

Для того, чтобы задать прямоугольный импульс с необходимыми параметрами следуйте следующим указаниям:

1. Нажмите клавишу **Waveforms** на блоке фиксированных функций (5).
2. С помощью блока функциональных клавиш выберете форму сигнала (**Pulse**).
3. Далее с помощью этих же клавиш выберете настраиваемую величину и введите нужное значение.
4. Чтобы запустить сигнал, необходимо «открыть» порт. Для этого нажмите клавишу номера порта и далее первую функциональную клавишу (**Output, Off/On**)

*Примечание:*

При работе с прибором внимательно следите за тем, чтобы при запущенном сигнале, к нему ВСЕГДА был подключен лабораторный макет. Если необходимо отключить макет от генератора, то в первую очередь отключите подачу сигнала с выхода генератора.

## 7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 7.1. Какие параметры линии связи влияют на электромагнитную совместимость?
- 7.2. Какие параметры линии связи относятся к взаимным?
- 7.3. Какие линии связи называются "длинными", а какие "короткими"?
- 7.4. Какие помехи называются перекрестными наводками? За счет чего они образуются?
- 7.5. В каких случаях в коротких линиях связи преобладают емкостные, а в каких индуктивные связи?
- 7.6. Каким образом амплитуда помехи зависит от длительности исходного импульса?
- 7.7. Как амплитуда помехи зависит от постоянной цепи пассивной линии?
- 7.8. Как рассчитать емкостной делитель?

7.9. Нарисуйте эквивалентную схему емкостных связей двух линий передач.

7.10. Получите формулы для расчета истинных емкостей через измеренные для этой схемы?

## 8. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ефанов В.И., Тихомиров А.А. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и систем: Учебное пособие. Томск: ТУСУР, 2004. -298 с.
2. Князев А.Д., Кечиев Л.Н., Петров Б.В. Конструирование радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры с учетом электромагнитной совместимости. М.: Радио и связь, 1989. -224 с.
3. Преснухин Л.Н., Воробьев Н.В., Шишкевич А.А. Расчет элементов цифровых устройств. М.: Высшая школа, 1982. -384 с.
4. Газизов Т.Р. Электромагнитная совместимость и безопасность радиоэлектронной аппаратуры: Учебное пособие. Томск: "ТМЛ-Пресс", 2007. -256 с.
5. Уильямс Т. ЭМС для разработчиков продукции / Пер. с англ. В.С. Кармышев, Л.Н. Кечиев. М.: Издательский Дом "Технологии", 2003. -540 с.
6. Осциллографы серии InfiniiVision 7000. Руководство для пользователя.
7. Генераторы сигналов специальной и произвольной формы серии 33500. Руководство для пользователя.