

АНАЛИЗ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ, РАЗРАБОТКИ И ПРИМЕНЕНИЯ ИММИТАНСНЫХ ЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

В статье проведен анализ метрологического обеспечения разработки и применения иммитансных логических элементов (ИЛЭ). Определены основные параметры ОЛЭ и методы их измерения, а также пути совершенствования метрологического обеспечения.

Работа представляет интерес для ученых-метрологов, специалистов, магистров и аспирантов.

Ключевые слова: иммитанс, логический элемент, обобщенный преобразователь иммитанса.

N.A. FILINYUK, L.B. LISCHINSKAYA, R. Y. CHEHMESTRUCK

Vinnitsia National Technical University

METROLOGICAL SUPPORT ANALYSIS, DEVELOPMENT AND APPLICATION OF IMMITANCE LOGIC ELEMENTS

In the article the main settings of the ILE (imittance logic elements) were analyzed and revealed that most of them coincide with the settings of the video-impacted elements but differ by their physical substance. For the ILE one can pick out a number of setting: the FAN-in $K_{об}$, which points out the number of inputs of the logic elements; the FAN-out $K_{раз}$, which points out the number of logic inputs that can be loaded to this particular output; the time of $t_{зд}$ propagation delay, which characterizes the processing speed of the element; the immunity $U_{п}$, which characterizes the ability of the logic element not change the state of the elements under the influence of interference signals, which may result from fluctuations of supply voltage, and also the result of parasitic capacitance and inductance, or external electromagnetic fields; the power supply voltage; power dissipation element; operating temperature range. There is no standard equipment of direct measurement for the above-enumerated settings. On this basis there are two ways to solve this problem: development of specialized measurement systems to determine each of the settings, the use of indirect methods of measurement including the measurement of the imittance matrixes and loads, noise coefficient, bandwidth, and the total time delay of the signal in the ILE, and then calculating the settings of the ILE. The main advantage of the second solution is its relative cheapness and simplicity of achievement. The main disadvantage is a great laboriousness of diverse measurements and possible increase of errors in the process of analytical calculations.

Keywords: imittance, logic element, generalized imittance convertor.

Введение

Имитансные логические элементы (ИЛЭ) [1] относятся к радиочастотным логическим элементам [2, 3, 4], работающим в диапазоне сверхвысоких частот (СВЧ). В известных радиочастотных логических элементах в качестве информационного параметра используется параметр гармонического сигнала (частота, амплитуда, фазовая задержка) или параметр радиочастотных импульсов (амплитуда, длительность, частота следования, кодоимпульсная последовательность). Имитансные логические элементы в качестве информационного параметра используют характер иммитансного параметра – дифференциальное положительное или отрицательное активное сопротивление ($R^{(+)}$, $R^{(-)}$), емкость ($C^{(+)}$, $C^{(-)}$), или индуктивность ($L^{(+)}$, $L^{(-)}$). Соответствующий логический уровень задается не количественной величиной иммитансного параметра, а только его характером или знаком, что повышает помехоустойчивость ИЛЭ. Не являясь конкурентом видеоимпульсных логических элементов, ИЛЭ в области СВЧ кроме высокой помехоустойчивости обладают также высоким быстродействием, т.к. их работа, в отличие от большинства логических элементов, не основана на использовании изменения рабочей точки полупроводникового прибора. Учитывая, что разработка и применение ИЛЭ находится на начальном этапе, возникает необходимость их метрологического обеспечения.

Цель и задачи исследования

Целью исследования является анализ метрологического обеспечения разработки и применения ИЛЭ. Для достижения этой цели в работе решаются следующие задачи: определение основных параметров ИЛЭ; анализ методов и средств измерения основных параметров ИЛЭ; формулировка путей обеспечения и совершенствования метрологического обеспечения разработки и применения ИЛЭ.

Определение основных параметров ИЛЭ

В настоящее время не существует стандартов, где были бы определены основные параметры ИЛЭ. Поэтому за их основу возьмем получившие широкое применение основные параметры видеоимпульсных логических элементов и проведем их корректирование и дополнение применительно к ИЛЭ.

Большое количество видеоимпульсных логических элементов характеризуется системой основных параметров, к которым относятся [5]:

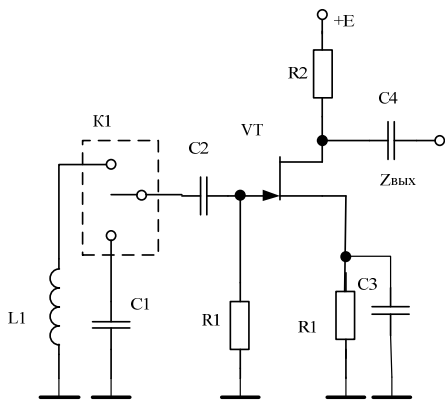
1. Коэффициент объединения по входу $K_{об}$, указывающий число входов логического элемента;
2. Коэффициент разветвления по выходу $K_{раз}$, указывающий на сколько входов логических элементов может быть нагружен выход данного элемента;
3. Время задержки распространения сигнала $t_{зд}$, характеризующие быстродействие элемента;
4. Помехоустойчивость $U_{п}$, характеризующая способность логического элемента не изменять

состояние элементов при действии сигналов помехи, которые могут возникнуть вследствие пульсаций напряжения питания, а также в результате действия паразитных емкостей и индуктивностей или внешних электромагнитных полей;

5. Напряжение источника питания;
6. Мощность рассеяния элемента;
7. Диапазон рабочих температур;
8. Выходные напряжения, соответствующие логической единице и логическому нулю;
9. Порог переключения схемы;
10. Время нарастания и спада фронта выходного сигнала.

Анализ приведенных параметров показывает, что большинство из них могут быть применены и к ИЛЭ за исключением 8, 9 и 10 параметров, не имеющих смысла исходя из физики работы ИЛЭ.

Детализацию каждого из параметров проведем на примере иммитансного логического LC – элемента, реализующего логическую функцию «НЕ» (рис. 1а). Он состоит из полевого транзистора (ПТ), включенного по схеме с общим истоком [6], используемого в качестве обобщенного преобразователя иммитанса (ОПИ).



а)

Вход		Выход	
C	0	L	1
L	1	C	0

в)

Преобразуемое сопротивление	Преобразованное сопротивление Z _{вых}
$Z_L = j\omega L_1 \rightarrow$	$C_{ВЫХ} = \omega^2 D L_1$ $R_{ВЫХ} = -1 / \omega^2 \omega_S D L_1$
$Z_C = 1 / j\omega C_1 \rightarrow$	$L_{ВЫХ} = C_1 / \omega^2 D$ $R_{ВЫХ} = -C_1 / \omega_S D$

б)

Рис. 1. Принципиальная электрическая схема иммитансного LC-логического элемента «НЕ» (а); таблица преобразования импеданса ОПИ на основе полевого транзистора с общим истоком(б); Таблица истинности иммитансного LC-логического элемента «НЕ» (в)

На рис. 1б $D = \omega_S^2 R_i \xi S_0$, где ω_S – граничная частота ПТ по крутизне, $\xi = C_{C3} / C_{ИЗ}$, R_i – дифференциальное сопротивление «затвор-исток», $C_{ИЗ}$ и C_{C3} – емкость между истоком и затвором и между затвором и стоком, S_0 – низкочастотное значение крутизны ПТ.

Для рассматриваемого ИЛЭ его быстродействие определяется задержкой прохождения сигнала с входа на выход [7] $\tau = \tau_{ex} + \tau_{ОПИ} + \tau_{вых}$, где τ_{ex} и $\tau_{вых}$ – постоянные времена входной и выходной цепи схемы, $\tau_{ОПИ}$ – время задержки сигнала в ОПИ.

Коэффициент разветвления по выходу ИЛЭ $K_{раз}$, зависит от мощности сигнала P_c и чувствительности ИЛЭ, подключенных к выходу рассматриваемого ИЛЭ при идентичных нагрузках [7].

$$K_{раз} = P_{вых.max} / kT_0 \Pi_{ш} q_{ex} (F_{ш} - 1),$$

где k – постоянная Больцмана; T_0 – абсолютная температура; $\Pi_{ш}$ – шумовая полоса; q_{ex} – коэффициент разветвления входной цепи; $F_{ш}$ – коэффициент шума.

Коэффициент объединения по входу $K_{об}$, по определению, для видеоимпульсных логических элементов равен числу входных клем логического элемента, а его увеличение достигается за счет использования специального расширителя. Для иммитансных логических элементов, амплитуда входного сигнала не влияет на его логическое состояние (при выполнении условия его работы в малосигнальном режиме), а определяющими факторами для коэффициента объединения по входу $K_{об}$ являются: допустимый диапазон изменения мнимой составляющей преобразуемого иммитанса $\Delta \text{Im } W_r$, при котором сохраняется

соответствующее логическое состояние ИЛЭ, и технологический, режимный и температурный разброс мнимой составляющей преобразуемого иммитанса $\Delta \text{Im} W_{ГР}$:

$$K_{об} = \Delta \text{Im} W_{Г} / \Delta \text{Im} W_{ГР}.$$

Помехоустойчивость ИЛЭ определяется влиянием на его иммитансную передаточную характеристику ряда дестабилизирующих факторов, к которым относятся: статические помехи – изменение температуры и напряжения питания; высокочастотные помехи – изменение мощности и частоты опорных колебаний; иммитансные помехи – изменение действительной и мнимой составляющих преобразуемого иммитанса. Особое место занимает внутренняя помеха, связанная с потенциальной неустойчивостью ОПИ. Для аналитической оценки помехоустойчивости ИЛЭ при воздействии различных видов дестабилизирующих факторов используются относительные коэффициенты: помехоустойчивость ИЛЭ по иммитансным уровням [8].

$$\gamma_C = \text{Re}(W_{12}W_{21}) - \sqrt{\text{Re}^2(W_{12}W_{21}) - 4C \text{Im} W_{22}}$$

логической «1» -

$$\gamma_L = \left| \frac{[\text{Re}(W_{12}W_{21}) - \sqrt{\text{Re}^2(W_{12}W_{21}) - 4C \text{Im} W_{21}}] \text{Im}(W_{22} - W_{Г0})}{2 \text{Im} W_{22} \sqrt{\text{Re}^2(W_{12}W_{21}) - 4B \text{Im}(W_{22} - W_{Г0})}} \right|,$$

где $C = \text{Im} W_{22} (\text{Re}^2 W_{11} + \text{Im}^2 W_{11}) - \text{Im}(W_{12}W_{21}) \text{Re} W_{11} - \text{Re}(W_{12}W_{21}) \text{Im} W_{11}$; W_{11} , W_{12} , W_{21} , W_{22} – иммитансные параметры ОПИ.

Коэффициент имеет допустимый диапазон изменения $0 < \xi_C < 1$ и $0 < \xi_L < 1$. Чем выше их значение, тем больше помехоустойчивость рассматриваемого ИЛЭ.

Учитывая, что ОПИ используемый при построении ИЛЭ реализуется на основе потенциально-неустойчивой транзисторной структуры, важным параметром ИЛЭ является запас его устойчивости. Для количественной оценки запаса устойчивости ИЛЭ возможно использование инвариантного коэффициента устойчивости K_y , который определяется через иммитансные W - параметры ОПИ и иммитансы генератора $W_{Г}$ и нагрузки $W_{н}$ [9]:

$$K_y = \frac{2 \text{Re}(W_{11} + W_{Г}) \text{Re}(W_{11} + W_{н}) - \text{Re}(W_{12}W_{21})}{|W_{12}W_{21}|}$$

Для обеспечения абсолютной устойчивости ИЛЭ необходимо, чтобы значение $K_c > 1$, которое обеспечивается за счет увеличения $\text{Re} W_{Г}$ или $\text{Re} W_{н}$.

Величина потребляемой мощности ИЛЭ определяется двумя составляющими: постоянной P_0 , которая является неизменной и определяется положением рабочей точки транзистора и высокочастотной $P_{вх}$, значение которой лежит в пределах от $P_{вх\text{min}}$ до $P_{вх\text{max}}$. Для эффективной работы ОПИ рабочая точка транзистора должна находиться в активной области, где коэффициент передачи по току (или крутизна) являются максимальными. Для малосигнального биполярного транзистора этот режим обеспечивается при токе коллектора порядке (2-3 мА) и напряжением $E_k = 5\text{В}$, т.е. $P_0 = (10-15)$ мВт. Для квазилинейного режима работы $P_{вх\text{max}} < 10^{-4}$ Вт, что значительно меньше P_0 . Таким образом, по потребляемой мощности ИЛЭ находятся на уровне потребления современных видеоимпульсных ЛЭ. Но их особенность заключается в том, что величина P_0 не меняется в процессе работы ИЛЭ, что исключает возникновение нелинейных переходных процессов, а мощность сигнала, которая расходуется на перевод ИЛЭ с одного логического состояния в другое, не превышает 10^{-4} Вт.

Оценка метрологического и инструментального обеспечения измерения параметров ИЛЭ

Анализ большинства выше рассмотренных параметров ИЛЭ по физической сути отличается от аналогичных параметров видеоимпульсных ЛЭ, методика измерения которых определена соответствующими стандартами [10,11]. Исходя из этого необходим анализ известных методов и средств применительно к измерению параметров ИЛЭ.

Считая, что мощность $P_{вх}$ и частота f_c опорного сигнала определены и неизменны, в процессе измерения параметров ИЛЭ необходимо и достаточно произвести измерение следующих параметров:

- параметров иммитансной матрицы ОПИ: W_{11} , W_{12} , W_{21} , W_{22} ;
- иммитансы генератора $W_{Г}$ и нагрузки $W_{н}$;
- полосу пропускания ИЛЭ - $P_{ш}$;
- коэффициент шума ИЛЭ - $F_{ш}$;
- постоянные времени входной и выходной цепи ИЛЭ и временную задержку в ОПИ, или суммарную задержку сигнала в ИЛЭ.

Для перечисленных параметров не существует стандартной аппаратуры их непосредственного измерения. Исходя из этого возможно два пути решения поставленной задачи: разработка специализированных измерительных комплексов, для определения каждого из параметров; использование косвенных методов измерения с применением для определения образующих параметров известные методы и средства с последующим расчётом параметров ИЛЭ по выше приведенным формулам. Достоинством второго решения является его относительная дешевизна и простота реализации. Недостаток – большая

трудоемкость разноплановых измерений и возможное увеличение погрешности в процессе аналитических расчётов.

Измерение параметров иммитансной матрицы ОПИ с необходимой точностью в диапазоне СВЧ возможно модифицированным методом плавающей нагрузки [11]. Для измерения иммитансов генератора W_g и нагрузки W_n наиболее точным, но и наиболее трудоемким является метод, основанный на использовании измерительной линии соответствующего диапазона. Погрешность таких измерений, для нагрузок, когда коэффициент стоячей волны не превышает 3-х единиц, составляет менее 10%.

Измерение полосы пропускания ИЛЭ $P_{ш}$, возможно путем применения панорамных измерителей АЧХ, например типа P2-67, P2-98, P2-135, R&S®FSW и т.д. Для измерения коэффициента шума возможно применение серийно выпускаемых измерителей типа X5-11, X5-30, X5M-18, R&S®ZVA и др. Наиболее серьезную проблему представляет измерение суммарной задержки сигнала в ИЛЭ τ для которой возможно использование серийной аппаратуры, используемой для измерения S-параметров четырехполосников, например РК4-71/1, РК4-73, R&S®NRP2[12], но требуется доработка методического обеспечения таких измерений.

Анализ перечисленных методов и их технического обеспечения указывает на большую трудоемкость и аппаратные затраты. Исходя из этого, одной из задач дальнейших исследований в этой области следует считать поиск более простых методов и средств измерения. Важной задачей также является оценка методических и инструментальных погрешностей таких измерений.

Выводы

1. Анализ основных параметров ИЛЭ показал, что большинство из них по определению совпадают с основными параметрами видеоимпульсных логических элементов, но отличаются по физической сущности.
2. Для измерения параметров ИЛЭ не пригодны стандартные методы и аппаратура используемая для измерения параметров видеоимпульсных логических элементов.
3. Возможны два пути решения задачи по измерению параметров ИЛЭ – разработка специальных измерительных комплексов или использование косвенных методов измерения включающих измерение параметров иммитансных матриц и нагрузок, коэффициента шума, полосы пропускания и суммарного времени задержки сигнала в ИЛЭ.

Литература

1. Ліщинська Л.Б. Імітансна логіка / Л.Б. Ліщинська, М.А. Філінюк // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2010. - №2(18). – С. 25-31.
2. Нейман М. С. О сверхвысококачественной вычислительной прерывной автоматике / М. С. Нейман // Электронные радиоимпульсные вычислительные системы дискретного действия. Труды МАИ. – 1962. – Вып. 149. – С. 3-8.
3. Кнорре К. Г. Фазовые и частотные СВЧ элементы / К. Г. Кнорре, В. М. Тузов, Г. И. Шур. – М.: Сов.радио, 1975. – 352 с.
4. Кичак В. М. Синтез частотно-імпульсних елементів цифрової техніки: монографія / В. М. Кичак. – Вінниця: УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2005. – 266 с. – ISBN 966-641-137-7.
5. Преснухин Л.Н. Цифровые вычислительные машины / Л. Н. Преснухин, П. В. Нестеров. – М.: Высшая школа, 1981. – 511 с.
6. Филинюк Н. А. Активные УКВ фильтры / Н. А. Филинюк. – М.: Радио и связь, 1984. – 56 с.
7. Ліщинська Л. Б. Оцінка основних параметрів імітансних логічних елементів / Л. Б. Ліщинська // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2011. - № 3 (22). – С. 45-52.
8. Лищинская Л. Б. Оценка помехоустойчивости иммитансных логических элементов / Л. Б. Лищинская // Радиотехника и электроника. – 2013. – Т. 58, №11. – С. 1136-1142.
9. Rollett J. Stability and power gain invariants of linear two-ports / J. Rollett // IRE Trans. Circuit Theory. – 1962. – Vol. CT-9, № 3. – P. 29-32.
10. ГОСТ 18683.1-83 Микросхемы интегральные цифровые. Методы измерения статистических электрических параметров.
11. ГОСТ 18683.2-83 Микросхемы интегральные цифровые. Методы измерения динамических электрических параметров.
12. Ліщинська Л.Б. Удосконалений метод "плаваючого навантаження" вимірювання параметрів імітансної матриці чотириполосника / Л.Б. Ліщинська // Вимірювальна техніка та метрологія : міжвід. наук.-техн. зб. - 2011. - Вип. 72. - С. 153.
13. Роде и Шварц (Rohde&Schwarz). Контрольно-измерительное оборудование. Режим доступа: http://www.rohde-schwarz.ru/products/test_and_measurement/

References

1. Lishhyn'ska L.B. Imitansnalogika / L.B. Lishhyn'ska, M.A. Filinjuk // Informacijnitetnologii' ta komp'juternainzhenerija. – 2010. - №2(18). – S. 25-31.
2. Nejman M. S. O sverhvysokochastotnojvychislitel'nojpreryvnojavtomatike / M. S. Nejman // Jelektronnyeradioimpul'snyevychislitel'nyesistemydiskretnogodejstvija. Trudy MAI. – 1962. – Vyp. 149. – S. 3-8.

3. Knorre K. G. FazovyeichastotnyeSVChjelementy / K. G. Knorre, V. M. Tuzov, G. I. Shur. – M.: Sov. radio, 1975. – 352 s.
4. Kychak V. M. Syntezchastotno-impul'snyhelementivcyfrovoi' tehniky: monografija / V. M. Kychak. – Vinnycja: UNIVERSUM – Vinnycja, 2005. – 266 s. – ISBN 966-641-137-7.
5. Presnuhin L.N. Cifrovyevychislitel'nyemashiny / L. N. Presnuhin, P. V. Nesterov. – M.: Vysshajashkola, 1981. – 511 s.
6. Filinjuk N. A. Aktivnye UKV fil'try / N. A. Filinjuk. – M.: Radio isvjaz', 1984. – 56 s.
7. Lishhyn's'ka L. B. Ocinkaosnovnyhparametrivimitansnyhlogichnyhelementiv / L. B. Lishhyn's'ka // Informacijnietechnologii' ta komp'juternainzhenerija. – 2011. - № 3 (22). – S. 45-52.
8. Lishhinskaja L. B. Ocenkapomehoustojchivostimmitansnyhlogicheskijelementov / L. B. Lishhinskaja // Radiotekhnikaijelektronika. – 2013. – T. 58, №11. – S. 1136-1142
9. Rollett J. Stability and power gain invariants of linear two-ports / J. Rollett // IRE Trans. Circuit Theory. – 1962. – Vol. CT-9, № 3. – P. 29-32.
10. GOST 18683.1-83 Mikroshemyintegral'nyecifrovye. Metodyizmerenijastatisticheskijelektricheskijparametrov.
11. GOST 18683.2-83 Mikroshemyintegral'nyecifrovye. Metodyizmerenijadinamicheskijelektricheskijparametrov.
12. Lishhyn's'ka L.B. Udoskonalenyjmetod "plavajuchohonavantazhennja" vymirjuvan'naparametrivimitansnoi' matrycichotyrypol'jusnyka / L.B. Lishhyn's'ka // Vymirjuval'natehnika ta metrologija : mizhvid. nauk.-tehn. zb. - 2011. - Vyp. 72. - S. 153.
13. Rode iShvarc (Rohde & Schwarz). Kontrol'no-izmeritel'noeoborudovanie. Rezhimostupa: http://www.rohde-schwarz.ru/products/test_and_measurement/

Рецензія/Peer review : 23.2.2014 р.

Надрукована/Printed : 9.4.2014 р.
Рецензент: Троцишин І.В., д.т.н., проф.