

МОНОИММИТАНСНЫЙ ЛОГИЧЕСКИЙ R-ЭЛЕМЕНТ «И»

Приведено обоснование схемы моноиммитансного логического R-элемента «И». Исследовано влияние на характеристики логического элемента таких дестабилизирующих факторов, как нестабильность волнового сопротивления отрезков линии передачи, нестабильность длины отрезков линии передачи и наличие паразитной реактивной составляющей во входном иммитансе.

Ключевые слова: логический элемент, иммитанс, дестабилизирующие факторы.

N. A. FILINYUK, L. B. LISHCHYNSKA, O. V. VOYCEKHOVSKA, V. P. STAKHOV
Vinnytsia national technical university

MONOIMMITTANCE LOGIC R-ELEMENT «AND»

Abstract – This paper deal with the logical monoimpittance R-element "AND", using active impittance as a information parameter. There are mathematical model and truth table of the R-monoimpittance logic element "AND" received in this article. The effect of destabilizing factors on the characteristics of the logical monoimpittance R-element "AND" such as the instability of the wave resistance of the transmission line, the emergence of the transmission line segments length and the emergence of parasitic reactance in the input impittance is researched. The results showed that the change in the wave resistance of the transmission line does not affect on operation of the circuit. Changing of the input reactive impedance in the range of 0 - 10 ohms linearly affects to the reactive impedance output, the output active impedance does not vary more than 2% and is within the logic levels "0" and "1". With error of the transmission line length in 0...1,0 mm output active impedance does not vary more than 2% and is within the logic levels "0" and "1", the output reactive impedance varies linearly. Noise immunity of monoimpittance R-logic element "AND" has a value of at least 0.98 in all these cases.

Keywords: logic gate, impittance, destabilizing factors.

Вступление

Логические элементы играют определяющую роль в вычислительной технике, где среди всех видов логических элементов основное место занимают видеоимпульсные логические элементы. С развитием информационных технологий появляются все новые требования к быстродействию, помехозащищенности, энергоэффективности, размерам логических элементов и так далее. Реализация всех этих требований не всегда возможна на базе видеоимпульсных элементов. Поэтому постоянно ведутся поиски новых принципов построения логических элементов, соответствующих определенным специфическим требованиям. Примером таких исследований является разработка радиочастотных логических элементов, способных осуществлять логические операции на несущей частоте сигнала [1, 2]. Одним из разновидностей радиочастотных логических элементов являются иммитансные логические элементы, использующие в качестве информационного параметра характер или величину иммитанса [3]. Благодаря использованию иммитанса становится возможным существенно повысить помехозащищенность и энергетическую эффективность логического элемента [4].

Иммитансные логические элементы могут использовать в качестве информационного параметра резистивный, индуктивный или емкостной иммитанс, а также их комбинации. При одновременном использовании нескольких видов иммитанса логические элементы называются мультииммитансными, а при использовании одного типа иммитанса - моноиммитансными логическими элементами [5]. Для практического использования более целесообразными являются моноиммитансные логические элементы, использующие один информационный параметр, например, только активное сопротивление - (R-элемент), емкостной иммитанс - (C-элемент) или индуктивный иммитанс - (L-элемент) [6]. Моноиммитансные логические элементы имеют высокое быстродействие и энергетическую эффективность, но меньшую помехозащищенность, чем мультииммитансные логические элементы. Оценка помехозащищенности и методов ее повышения требуют дополнительных исследований.

Целью работы является разработка моноиммитансного логического элемента «И», использующего в качестве информационного параметра активное сопротивление, и исследование его работы в диапазоне изменения дестабилизирующих факторов. Для достижения этой цели решаются следующие задачи:

1. Обоснование схемы моноиммитансного логического R-элемента «И» и разработка его математической модели.
2. Исследование влияния дестабилизирующих факторов на характеристики моноиммитансного логического R-элемента «И».

**Обоснование схемы моноиммитансного логического R-элемента «И»
и его математической модели**

Для моноиммитансного логического R-элемента (рис.1а) информационным параметром является активный иммитанс «R», а логическое состояние элемента характеризуется диапазоном значений этого параметра. Таким образом, логической единице "1" соответствует диапазон изменения $R^{(1)} > R_0$, а логическому нулю - «0» соответствует диапазон изменения $R^{(0)} < R_0$, где R_0 - резистивная граница

логіческого уровня. Работу моноиммитансного логического R-элемента «И» (рис.1а) можно описать таблицей истинности, которая представлена на рис.1б.

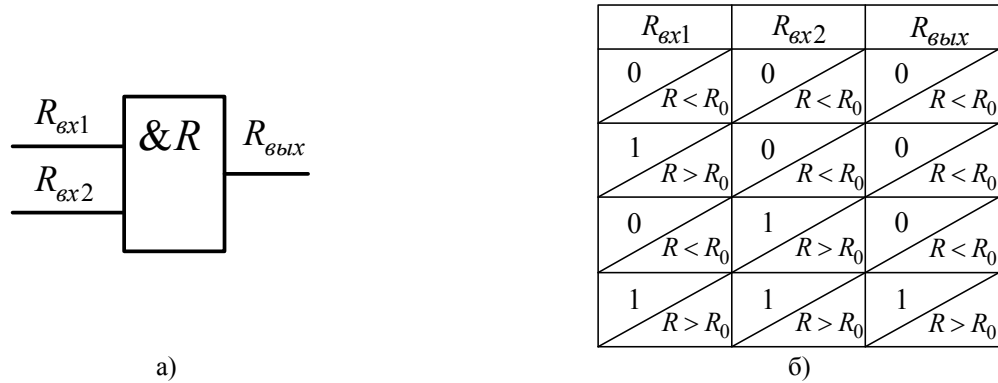


Рис. 1. Схематическое обозначение (а) и таблица истинности (б) моноиммитансного логического R-элемента «И»

Электрическая схема возможного варианта реализации моноиммитансного логического R-элемента «И» представлена на рис.2а.

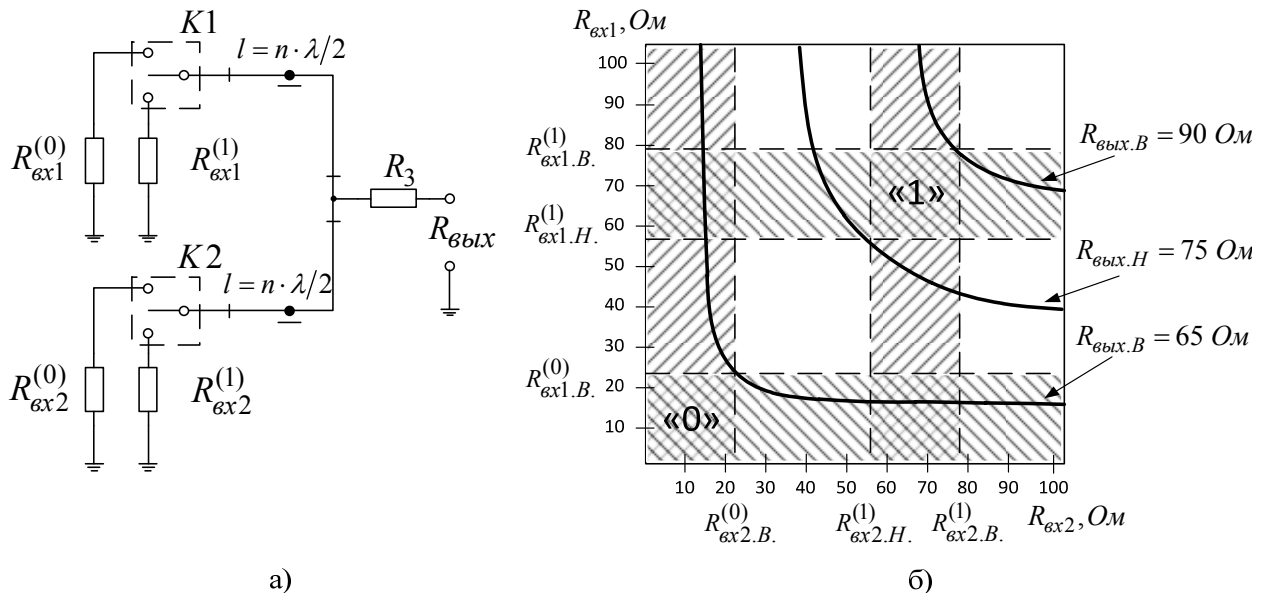


Рис. 2. Электрическая схема (а) и иммитансная передаточная характеристика моноиммитансного логического R-элемента "И" (б) (на схеме K1 и K2 - условные переключатели)

Выходное активное сопротивление схемы при условии, что длина всех соединительных отрезков линии передачи $l = n \cdot \lambda/2$, где $n = 0, 1, 2, \dots$, λ – длина электромагнитной волны в линии передачи, равно:

$$R_{вых} = R_3 + \frac{R_{ex1} R_{ex2}}{R_{ex1} + R_{ex2}} \tag{1}$$

Уравнение (1) является математической моделью идеального моноиммитансного логического R-элемента «И» и описывает его иммитансную передаточную характеристику, которая представляет собой в координатах R_{ex1} и R_{ex2} семейство равноугонных гипербол, положение которых может регулироваться величиной резистора R_3 .

Ограничим нулевой логический уровень диапазоном изменения входного сопротивления ($0 \div R_{ex.B}^{(0)}$), а единичный уровень – диапазоном ($R_{ex.H}^{(1)} \div R_{ex.B}^{(1)}$). Для обеспечения запаса схемы по помехоустойчивости, задаемся верхней границей нулевого логического уровня на выходе схемы из условия $R_{вых.B}^{(0)} < R_{ex.B}^{(0)}$. При этом нижняя граница этого уровня $R_{вых.H}^{(0)} = 0$. Исходя из требований помехоустойчивости границу единичного логического уровня на выходе схемы определяем из условий: $R_{вых.H}^{(1)} > R_{ex.H}^{(1)}$, $R_{вых.B}^{(1)} > R_{ex.B}^{(1)}$. С учетом введенных ограничений и в соответствии с таблицей истинности, представленной на рис.1б, области работы моноиммитансного логического R-элемента «И» определяются заштрихованными квадратами «0» и «1» на рис.2б (при условии $R_3 = 50 \text{ Ом}$).

На практике параметры реального моноиммитансного логического R-элемента «И» будут

отличаться от параметров выше рассматриваемого «идеального» элемента из-за влияния дестабилизирующих факторов.

Для обеспечения помехоустойчивости в реальном элементе граница между логическим нулем и единицей определяется не Z_0 , а диапазоном значений R_{ex} и $R_{вых}$ (рис. 2б):

$$R_{ex.B}^{(0)} < R_{ex} < R_{ex.H}^{(1)}, \quad (2)$$

$$R_{вых.B}^{(0)} < R_{вых} < R_{вых.H}^{(1)}. \quad (3)$$

Таким образом диапазон возможных значений активного импеданса, который соответствует логическому «0» и «1», равен:

- для входного импеданса

$$0 < R_{ex}^{(0)} \leq R_{ex.B}^{(0)}; \quad R_{ex.H}^{(1)} < R_{ex}^{(1)} < \infty, \quad (4)$$

- для выходного импеданса

$$0 < R_{вых}^{(0)} \leq R_{вых.B}^{(0)}; \quad R_{вых.H}^{(1)} < R_{вых}^{(1)} < \infty \quad (5)$$

Исследование влияния дестабилизирующих факторов на характеристики логического элемента

В реальном моноиммитансном логическом элементе выходной иммитанс $Z_{вых}$ связан с выходными импедансами $R_{вых1}$ и $R_{вых2}$ отрезков l_1 , l_2 линии передачи. В общем виде приведенный выходной импеданс отрезка линии передачи равен [7]:

$$\bar{Z}_{вых} = \frac{\bar{Z}_{ex} + j \cdot \operatorname{tg} \beta}{1 + j \cdot \bar{Z}_{ex} \cdot \operatorname{tg} \beta} = \operatorname{Re} \bar{Z}_{вых} + j \cdot \operatorname{Im} \bar{Z}_{вых}, \quad (6)$$

где:

$$\operatorname{Re} \bar{Z}_{вых} = \bar{R}_{вых} = \frac{\bar{R}_{ex} \cdot (1 - \bar{X}_{ex} \cdot \operatorname{tg} \beta) + \bar{R}_{ex} \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot (\bar{X}_{ex} + \operatorname{tg} \beta)}{(1 - \bar{X}_{ex} \cdot \operatorname{tg} \beta)^2 + (\bar{R}_{ex} \cdot \operatorname{tg} \beta)^2}, \quad (7)$$

$$\operatorname{Im} \bar{Z}_{вых} = \bar{X}_{вых} = \frac{(1 - \bar{X}_{ex} \cdot \operatorname{tg} \beta) \cdot (\bar{X}_{ex} + \operatorname{tg} \beta) - \bar{R}_{ex}^2 \cdot \operatorname{tg} \beta}{(1 - \bar{X}_{ex} \cdot \operatorname{tg} \beta)^2 + (\bar{R}_{ex} \cdot \operatorname{tg} \beta)^2}, \quad (8)$$

$$\bar{R}_{вых} = \frac{R_{вых}}{Z_0}, \quad \bar{X}_{вых} = \frac{X_{вых}}{Z_0}, \quad \bar{R}_{ex} = \frac{\operatorname{Re} Z_{ex}}{Z_0}, \quad \bar{X}_{ex} = \frac{\operatorname{Im} Z_{ex}}{Z_0}.$$

$\beta = 2\pi l/\lambda$ - фазовая постоянная; Z_0 - волновое сопротивление отрезков линии передачи.

Так как информационным параметром рассматриваемого логического элемента является активное сопротивление, рассчитывались активные составляющие импеданса:

$$R_{вых1} = Z_0 \cdot \frac{R_{ex1}/Z_0 \cdot (1 - X_{ex1}/Z_0 \cdot \operatorname{tg} \beta) + R_{ex1}/Z_0 \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot (X_{ex1}/Z_0 + \operatorname{tg} \beta)}{(1 - X_{ex1}/Z_0 \cdot \operatorname{tg} \beta)^2 + (R_{ex1}/Z_0 \cdot \operatorname{tg} \beta)^2}, \quad (9)$$

$$R_{вых2} = Z_0 \cdot \frac{R_{ex2}/Z_0 \cdot (1 - X_{ex2}/Z_0 \cdot \operatorname{tg} \beta) + R_{ex2}/Z_0 \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot (X_{ex2}/Z_0 + \operatorname{tg} \beta)}{(1 - X_{ex2}/Z_0 \cdot \operatorname{tg} \beta)^2 + (R_{ex2}/Z_0 \cdot \operatorname{tg} \beta)^2}, \quad (10)$$

С учетом (9) и (10) выходная активная составляющая импеданса моноиммитансного реального логического R-элемента «И» описывается выражением:

$$R_{вых} = R_3 + \frac{(R_{вых1})^2 \cdot R_{вых2} + R_{вых1} \cdot (R_{вых2})^2 + R_{вых1} \cdot (X_{вых2})^2 + R_{вых2} \cdot (X_{вых1})^2}{(R_{вых1})^2 + 2 \cdot R_{вых1} \cdot R_{вых2} + (R_{вых2})^2 + (X_{вых1})^2 + 2 \cdot X_{вых1} \cdot X_{вых2} + (X_{вых2})^2}. \quad (11)$$

Аналогичным образом рассчитываются и реактивные составляющие импеданса схемы:

$$X_{вых1} = Z_0 \cdot \frac{(1 - X_{ex1}/Z_0 \cdot \operatorname{tg} \beta) \cdot (X_{ex1}/Z_0 + \operatorname{tg} \beta) - (R_{ex1}/Z_0)^2 \cdot \operatorname{tg} \beta}{(R_{ex1}/Z_0 \cdot \operatorname{tg} \beta)^2 + (1 - X_{ex1}/Z_0 \cdot \operatorname{tg} \beta)^2}, \quad (12)$$

$$X_{вых2} = Z_0 \cdot \frac{(1 - X_{ex2}/Z_0 \cdot \operatorname{tg} \beta) \cdot (X_{ex2}/Z_0 + \operatorname{tg} \beta) - (R_{ex2}/Z_0)^2 \cdot \operatorname{tg} \beta}{(R_{ex2}/Z_0 \cdot \operatorname{tg} \beta)^2 + (1 - X_{ex2}/Z_0 \cdot \operatorname{tg} \beta)^2}, \quad (13)$$

$$X_{вых} = \frac{(X_{вых1})^2 \cdot X_{вых2} + X_{вых1} \cdot (X_{вых2})^2 + (R_{вых1})^2 \cdot X_{вых2} + (R_{вых2})^2 \cdot X_{вых1}}{(R_{вых1})^2 + 2 \cdot R_{вых1} \cdot R_{вых2} + (R_{вых2})^2 + (X_{вых1})^2 + 2 \cdot X_{вых1} \cdot X_{вых2} + (X_{вых2})^2}. \quad (14)$$

Из анализа выражений (9-14) следует, что основными дестабилизирующими факторами, которые влияют на выполнение неравенств (4) и (5), являются:

- нестабільність волнового опору Z_0 отрезков линии передачи;
- погрешность длины отрезка линии передачи Δl ;
- появление во входных импедансах Z_{ex1} и Z_{ex2} паразитных реактивных составляющих X_{ex1} и X_{ex2} .

Задачей исследования является оценка влияния перечисленных дестабилизирующих факторов и поиск путей для их минимизации.

Для моделирования работы схемы в условиях, приближенных к реальным, зададимся значениями параметров волнового сопротивления Z_0 отрезков линии передачи, длины отрезка линии передачи l и паразитных реактивных составляющих X_{ex1} и X_{ex2} с учетом погрешности технологического процесса. Таким образом волновое сопротивление отрезков линии передачи $Z_0 = 50 \pm 0,5 \text{ Ом}$, погрешность длины отрезка линии передачи $\Delta l = 0 \dots 1,0 \text{ мм}$ и паразитная реактивная составляющая $X_{ex} = 0,1 \text{ Ом}$. Моделирование будем проводить для всех возможных состояний логического элемента – для входных логических уровней (0;0), (0;1), (1;0) и (1;1), где, согласно рис. 2б, входной логический уровень «0» подразумевает собою входной импеданс $R_{ex} = 10 \text{ Ом}$, а входной логический уровень «1» - входной импеданс $R_{ex} = 70 \text{ Ом}$. Частота сигнала генератора $f = 10 \text{ ГГц}$.

Оценим влияние нестабильности волнового сопротивления Z_0 линии передачи на выходной активный и выходной реактивный импедансы логического элемента. Так как одним из условий построения моноиммитансного логического R-элемента «И» является условие $l = n \cdot \lambda/2$, то $tg\beta = tg(2\pi l/\lambda) = 0$. В этом случае из уравнений (9, 10) следует, что $R_{ex1} = R_{ex}$, а из уравнений (12, 13) следует, что $X_{ex1} = X_{ex}$. Таким образом можно сделать вывод, что в рассматриваемом случае выходные активный и реактивный импедансы не зависят от волнового сопротивления Z_0 отрезка линии передачи.

Для оценки чувствительности выходного активного импеданса R_{ex} логического элемента от воздействия паразитного реактивного импеданса X_{ex} будем считать, что $Z_0 = 50 \text{ Ом}$, длина отрезка линии передачи l соответствует идеальному логическому элементу. В этом случае зависимость относительной чувствительности величины выходного логического уровня R_{ex} от величины паразитной реактивной составляющей X_{ex} во входном импедансе:

$$S_{X_{ex}}^{R_{ex}} = \frac{\partial R_{ex}}{\partial X_{ex}} \cdot \frac{R_{ex}}{X_{ex}} \quad (15)$$

Учитывая, что для сравнительной оценки помехозащищенности иммитансного логического элемента целесообразно использовать нормированный параметр, введен коэффициент помехозащищенности вида $\Upsilon_{X_{ex}} = \frac{1}{1 + |S_{X_{ex}}^{R_{ex}}|}$, диапазон изменения которого $0 \leq \Upsilon_{X_{ex}} \leq 1$.

На рис. 3 приведены зависимости выходного активного R_{ex} , и реактивного X_{ex} импедансов, чувствительности выходного активного импеданса $S_{X_{ex}}^{R_{ex}}$ и помехозащищенности $\Upsilon_{X_{ex}}$ от изменения входного реактивного импеданса X_{ex} при входных логических уровнях (0;0), (0;1), (1;0) и (1;1):

Из графика на рис.3а следует, что при изменении входного реактивного импеданса X_{ex} в пределах 0 - 10 Ом выходной активный импеданс R_{ex} не выходит за границы логических уровней «0» и «1», причем из графика чувствительности выходного активного импеданса $S_{X_{ex}}^{R_{ex}}$ на рис.3в следует, что выходной активный импеданс R_{ex} изменяется не более чем на 2%. Изменение входного реактивного импеданса X_{ex} линейно влияет на выходной реактивный импеданс X_{ex} (рис.3б). Помехозащищенность в этом случае имеет значение не менее 0,98 (рис.3г), и ухудшается с ростом входного реактивного импеданса X_{ex} .

На рис.4 представлены расчетные зависимости активной и реактивной составляющих выходного импеданса от изменения длины отрезка линии передачи Δl при $X_{ex} = 0,1 \text{ Ом}$ и $Z_0 = 50 \text{ Ом}$, а также чувствительности выходного активного импеданса $S_{\Delta l}^{R_{ex}}$ и помехозащищенности $\Upsilon_{\Delta l} = \frac{1}{1 + |S_{\Delta l}^{R_{ex}}|}$ от изменения длины отрезка линии передачи Δl при входных логических уровнях (0;0), (0;1), (1;0) и (1;1):

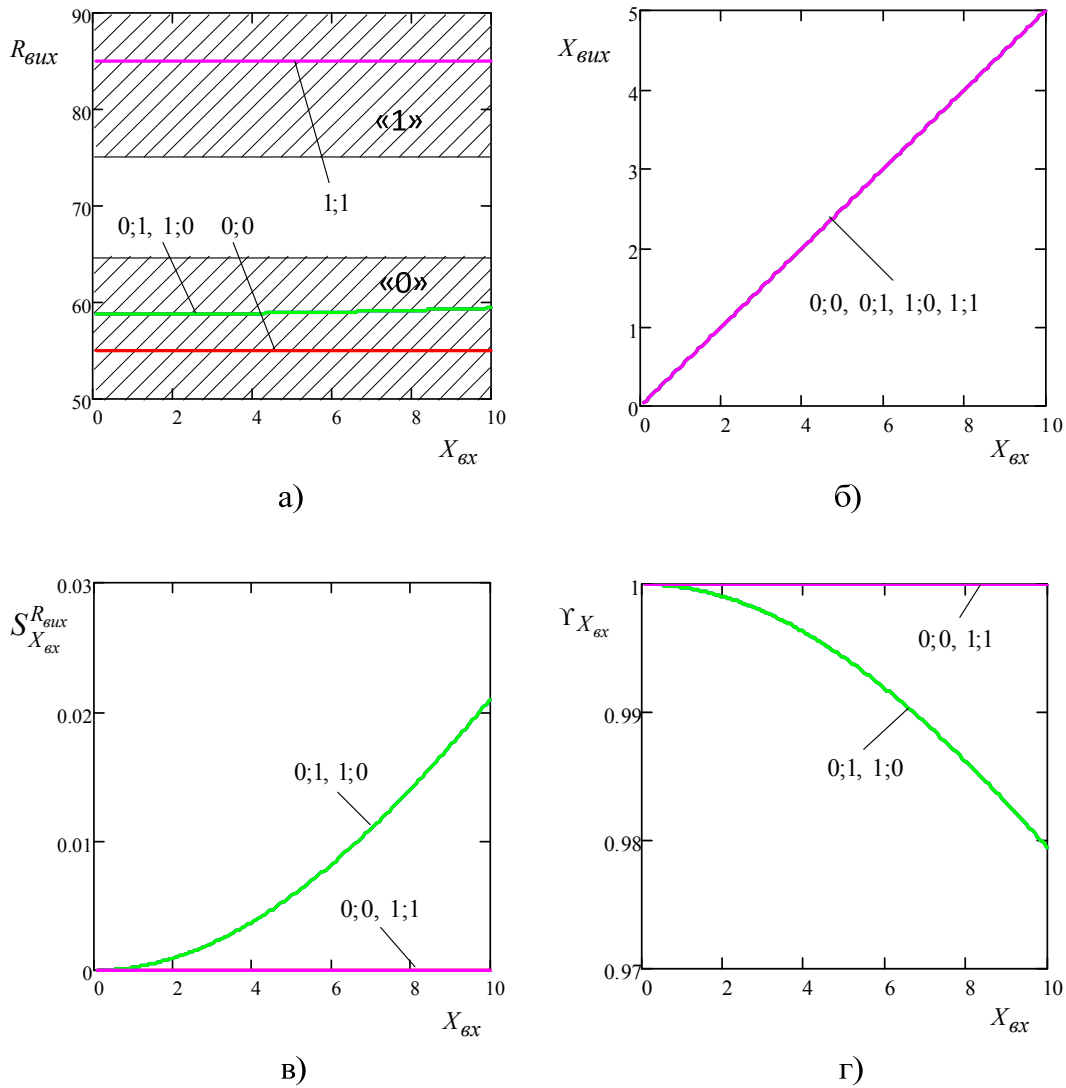


Рис. 3. Расчетные зависимости выходного активного $R_{блх}$ (а),

и реактивного $X_{блх}$ (б) импедансов, чувствительности выходного активного импеданса $S_{X_{вх}}^{R_{блх}}$ (в)

и помехозащищенности $Y_{X_{вх}}$ (г) от изменения входного реактивного импеданса $X_{вх}$.

Из графика на рис.4а следует, что при погрешности реализации длины отрезка линии передачи $\Delta l = 0...1,0$ мм выходной активный импеданс $R_{блх}$ не выходит за границы логических уровней «0» и «1», причем из графика чувствительности выходного активного импеданса $S_{\Delta l}^{R_{блх}}$ на рис.4в следует, что выходной активный импеданс $R_{блх}$ изменяется не более чем на $\pm 2\%$. Из графика на рис.4б следует, что с ростом погрешности реализации длины отрезка линии передачи Δl при входных логических уровнях (0;0), (0;1) и (1;0) значение выходного реактивного импеданса $X_{блх}$ линейно растет, а при входном логическом уровне (1;1) значение $X_{блх}$ линейно спадает. Помехозащищенность в этом случае имеет значение не менее 0,98 (рис.3г), и ухудшается с ростом погрешности реализации длины отрезка линии передачи Δl .

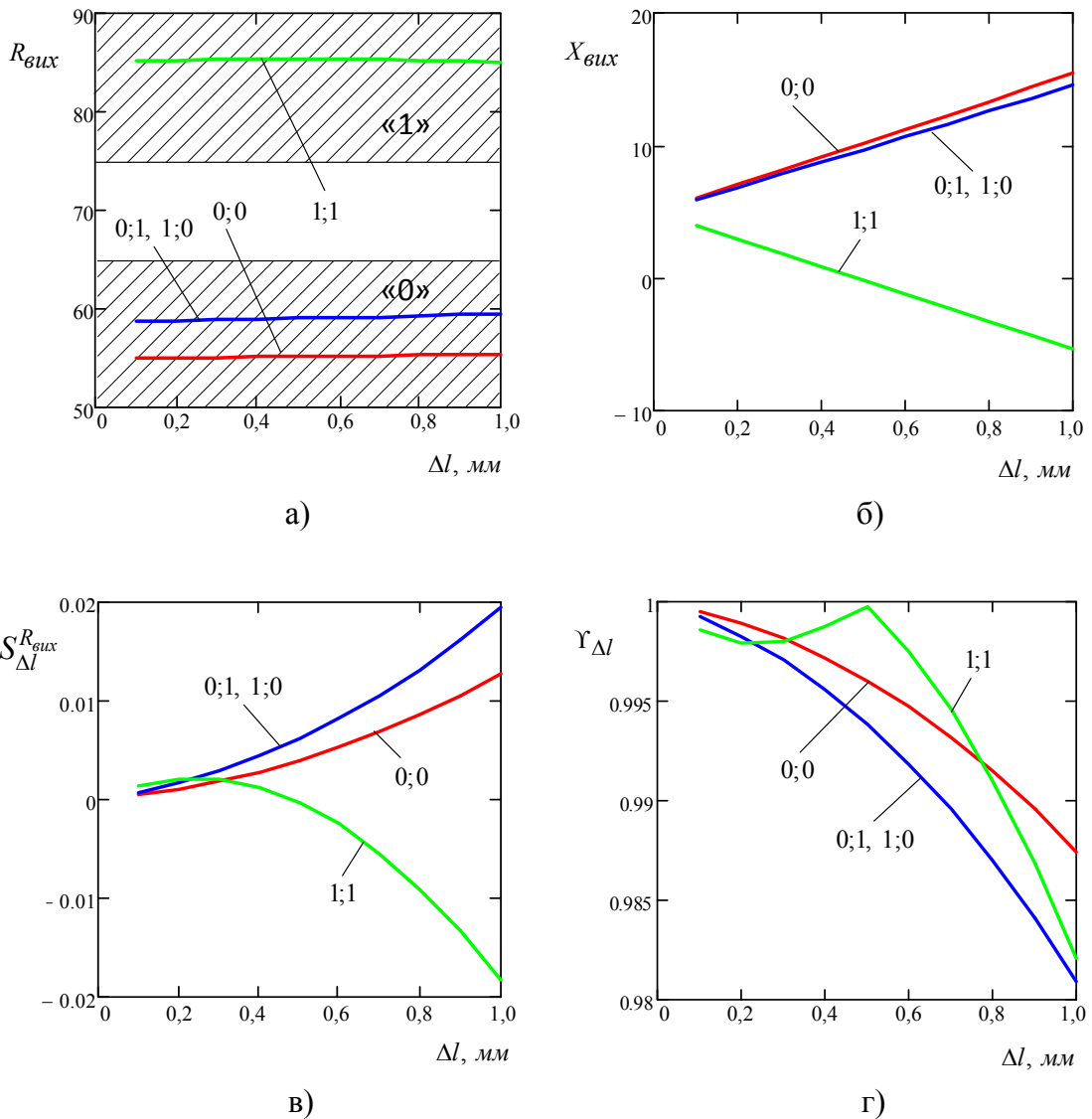


Рис. 4. Расчетные зависимости активной $R_{вых}$ (а), и реактивной $X_{вых}$ (б) составляющих выходного импеданса, чувствительности выходного активного импеданса $S_{\Delta l}^{R_{вых}}$ (в) и помехозащищенности $\gamma_{\Delta l}$ (г) от изменения длины отрезка линии передачи Δl .

Выводы

Проведенные исследования влияния паразитных факторов (изменения волнового сопротивления Z_0 линии передачи и погрешности длины отрезка линии передачи Δl , а также наличие паразитного входного импеданса $X_{вх}$) на передаточную характеристику моноиммитансного логического R-элемента «И» показали, что изменение величины волнового сопротивления Z_0 не влияет на выходной активный и выходной реактивный импедансы схемы. Изменение входного реактивного импеданса $X_{вх}$ линейно влияет на выходной реактивный импеданс $X_{вых}$, выходной активный импеданс $R_{вых}$ при изменении входного реактивного импеданса $X_{вх}$ в пределах 0 - 10 Ом изменяется не более чем на 2% и не выходит за границы логических уровней «0» и «1». При погрешности длины отрезка линии передачи $\Delta l = 0 \dots 1,0$ мм выходной активный импеданс $R_{вых}$ изменяется не более чем на 2% и не выходит за границы логических уровней «0» и «1», выходной реактивный импеданс $X_{вых}$ изменяется линейно, причем при входных логических уровнях (0;0), (0;1) и (1;0) значение выходного реактивного импеданса $X_{вых}$ линейно растет, а при входном логическом уровне (1;1) значение $X_{вых}$ линейно падает. Помехозащищенность моноиммитансного логического R-элемента «И» во всех приведенных случаях имеет значение не менее 0,98.

Литература

1. Электронные радиоимпульсные вычислительные системы дискретного действия / Под ред. Неймана М. С. // Труды московского авиационного института. Том 149. – М. : Оборонгиз, 1962. – 186 с.
2. Долгий И. Д. Введение в безопасную радиочастотную логику / Долгий И. Д., Кулькин А. Г., Кулькин С. А., Пономарев Ю. Э., Розенберг И. Н. // Известия Южного федерального университета. Технические науки. Выпуск № 6 (155). – 2014. – С. 229-238.
3. Ліщинська Л. Б. Імітансна логіка / Л. Б. Ліщинська, М. А. Філінюк // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. — 2010. — №. 2. — с. 25–31.
4. Ліщинська Л. Б. Оцінка основних параметрів імітансних логічних елементів / Л. Б. Ліщинська // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. - 2011. - № 3. - С. 45-52.
5. Filinyuk N. A. Monoimmittance logic R-elements / Filinyuk N. A., Lishchynskaya L.B., Voycekhovska O.V., Stakhov V. P. // П'ята міжнародна науково-практична конференція "Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія" - Івано-Франківськ – Вінниця, 27-29 травня, 2015 р.
6. Филинюк Н.А. Моноиммитансные логические RLC-элементы / Н.А. Филинюк, Л.Б. Лищинская, Е.В. Войцеховская, В.П. Стахов // Вісник Хмельницького національного університету, № 3. – 2015р. – с.117-121.
7. Электронные радиоимпульсные вычислительные системы дискретного действия / Под ред. Неймана М. С. // Труды московского авиационного института. Том 149. – М. : Оборонгиз, 1962. – 186 с.

References

1. Elektronnie radioimpulsnie vychislitelnie sistemi diskretnogo deistviya / Pod red. Neimana M. S. // Trudi moskovskogo aviacionnogo instituta. Tom 149. – M. : Oborongiz, 1962. – 186 s.
2. Dolgii I. D. Vvedenie v bezopasnuyu radiochastotnyuyu logiku / Dolgii I. D., Kulkin A. G., Kulkin S. A., Ponomarev Yu. E., Rozenberg I. N. // Izvestiya Yujnogo federalnogo universiteta. Tehnicheskie nauki. Vipusk № 6 (155). – 2014. – С. 229-238.
3. Lishhins'ka L. B. Imitatsna logika / L. B. Lishhins'ka, M. A. Filinjuk // Informacijni tehnologii ta komp'juterna inzhenerija. — 2010. — No. 2. — s. 25–31.
4. Lishhins'ka L. B. Ocinka osnovnih parametriv imitatsnih logichnih elementiv / L. B. Lishhins'ka // Informacijni tehnologii ta komp'juterna inzhenerija. - 2011. - № 3. - S. 45-52.
5. Filinyuk N. A. Monoimmittance logic R-elements / Filinyuk N. A., Lishchynskaya L.B., Voycekhovska O.V., Stakhov V. P. // P'jata mizhnarodna naukovo-praktichna konferencija "Informacijni tehnologii ta komp'juterna inzhenerija" - Ivano-Frankivs'k – Vinnicja, 27-29 travnja, 2015 r.
6. Filinjuk N.A. Monoimmitansnye logicheskie RLC-jelementy / N.A. Filinjuk, L.B. Lishhinskaja, E.V. Vojcehovskaja, V.P. Stahov // Vistnik Hmel'nic'kogo nacional'nogo universitetu, № 3. – 2015r. – s.117-121.
7. Jelektronnye radioimpul'snye vychislitel'nye sistemy diskretnogo dejstvija / Pod red. Nejmana M. S. // Trudy moskovskogo aviacionnogo instituta. Tom 149. – M. : Oborongiz, 1962. – 186 s.

Рецензія/Peer review : 18.12.2015 р.

Надрукована/Printed : 25.3.2016 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Перевозников С.И.