

Министерство образования и науки Украины
Винницкий национальный технический университет

ИММИТАНСНЫЕ ЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ И УСТРОЙСТВА

Монография

Под общей редакцией Н. А. Филинюка

Винница
ВНТУ
2016

УДК 621.38
ББК 32.85
И53

Авторы:

**Н. А. Филинюк, Л. Б. Лищинская, А. А. Лазарев, Е. В. Войцеховская,
С. Е. Фурса, Р. Ю. Чехместрук, В. П. Стахов**

Рекомендовано к печати Учёным советом Винницкого национального технического университета Министерства образования и науки Украины (протокол № 5 от 24.11.2016 г.)

Рецензенты:

В. С. Ситников, доктор технических наук, профессор
С. И. Перевозников, доктор технических наук, профессор

Имитансные логические элементы и устройства : монография / И53 Н. А. Филинюк, Л. Б. Лищинская, А. А. Лазарев и др. ; под общей ред. Н. А. Филинюка. – Винница : ВНТУ, 2016. – 188 с.
ISBN 978-966-641-680-6

В монографии обобщены прикладные результаты исследований в направлении разработки элементной вычислительной базы, способной работать на несущей частоте сигнала – радиочастотных логических элементов. Основой построения таких элементов являются активные и пассивные обобщённые преобразователи иммитанса, имеющие комплексный коэффициент преобразования иммитанса.

Книга рассчитана на научных сотрудников и специалистов, аспирантов и студентов, которые занимаются исследованием, проектированием и разработкой информационных устройств.

**УДК 621.38
ББК 32.85**

ISBN 978-966-641-680-6

© Н. Филинюк, Л. Лищинская, А. Лазарев, Е. Войцеховская,
С. Фурса, Р. Чехместрук, В. Стахов, 2016

ПОСВЯЩАЕТСЯ

преподавателям, научным сотрудникам, учебно-вспомогательному персоналу и аспирантам кафедры проектирования компьютерной и телекоммуникационной аппаратуры (АП, ПКТ, ПКОТ, ПКБТА, ПКТА), работавшим на кафедре в разные периоды с 1985 по 2015 год, и внёсшим огромный вклад в её становление, развитие и достижения

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	8
1 ЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ.....	10
1.1 Определения	10
1.2 Классификация	11
1.3 Основные параметры	12
2 ИММИТАНСКАЯ ЛОГИКА	14
2.1 Концепция «нечеткого иммитанса»	14
2.2 Обоснование иммитансной логики.....	16
3 ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ИММИТАНСА	20
3.1 Определение, классификация и основные параметры	20
преобразователей иммитанса.....	20
3.2 Методы и средства построения преобразователей иммитанса.....	23
3.2.1 Схемотехнические преобразователи иммитанса.....	23
3.2.2 Однотранзисторные преобразователи иммитанса	29
3.2.3 Пассивные преобразователи иммитанса	32
4 МУЛЬТИИММИТАНСНЫЕ ЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ	34
4.1 Структура	34
4.2 Синтез иммитансных логических R -элементов.....	35
4.2.1 Теоретическое обоснование методики.....	36
4.2.2 Практическая реализация	43
4.3 Оценка основных параметров активных мультииммитансных.....	48
логических элементов.....	48
4.3.1 Быстродействие.....	49
4.3.2 Коэффициент объединения по входу.....	50
4.3.3 Коэффициент разветвления по выходу	52
4.3.4 Запас устойчивости	53
4.3.5 Потребляемая мощность.....	54
4.4 Помехоустойчивость активного моноиммитансного логического	
элемента.....	55
4.4.1 Анализ видов помех иммитансных логических элементов	55
4.4.2 Аналитическая оценка помехоустойчивости.....	55
4.4.3 Количественная оценка помехоустойчивости.....	59
5 МОНОИММИТАНСНЫЕ ЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ	62
5.1 Классификация	62
5.2 Моноиммитансный логический R -элемент «НЕ».....	63
5.2.1 Обоснование схемы.....	63

5.2.2 Влияние дестабилизирующих факторов на характеристики логического элемента	64
5.3 Моноиммитансный логический R -элемент «И».....	68
5.3.1 Обоснование схемы моноиммитансного логического R -элемента «И»	68
5.3.2 Влияние дестабилизирующих факторов на характеристики логического элемента	71
5.4 Моноиммитансный логический R -элемент «ИЛИ».....	75
5.4.1 Обоснование схемы моноиммитансного логического R -элемента «ИЛИ».....	75
5.4.2 Влияние дестабилизирующих факторов на характеристики логического элемента	78
5.5 Моноиммитансный логический L -элемент «И».....	80
5.5.1 Обоснование схемы моноиммитансного логического L -элемента «И» и его математической модели.....	80
5.5.2 Влияние дестабилизирующих факторов на характеристики моноиммитансного логического L -элемента «И» и оценка запаса его помехоустойчивости	84
5.6 RS -триггер на моноиммитансных логических R -элементах «ИЛИ-НЕ»	89
5.6.1 Обоснование схемы RS -триггера и его математической модели	89
5.6.2 Влияние дестабилизирующих факторов на характеристики RS -триггера и оценка запаса его помехоустойчивости.....	95
5.7 Иммитансный сумматор по модулю 2	100
5.7.1 Обоснование схемы иммитансного сумматора по модулю 2 и разработка его математической модели	100
5.7.2 Исследование влияния дестабилизирующих факторов на характеристики иммитансного сумматора по модулю 2 и оценка запаса его помехоустойчивости	106
5.8 Моноиммитансный полусумматор	113
5.9 Моноиммитансный сумматор.....	117
5.10 Оценка основных параметров.....	122
6 ОПТОИМИТАНСНЫЕ ЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ.....	124
6.1 Обоснование оптоиммитансной логики	124
6.2 Техническая реализация	126
6.3 Быстродействие оптоиммитансных логических элементов.....	132
6.4 Оптоиммитансные преобразователи	133
6.4.1 Определение и классификация	133
6.4.2 Основные параметры	136
6.4.3 Техническая реализация	136
7 ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИМИТАНСНЫХ ЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ	140

7.1 Анализ метрологического обеспечения, разработки и применения иммитансных логических элементов.....	138
7.1.1 Определение основных параметров ИЛЭ	138
7.1.2 Оценка метрологического и инструментального обеспечения измерения параметров ИЛЭ	141
7.2 Устройства согласования видеоимпульсных и иммитансных схем.....	142
7.2.1 Формулировка требований.....	142
7.2.2 Обоснование и анализ схемотехнических реализаций ВИП прямого преобразования.....	143
7.2.3 Экспериментальная оценка параметров ВИП	146
7.3 Ограничители иммитанса.....	151
7.3.1 Определение и классификация ограничителей иммитанса	151
7.3.2 Обоснование основных параметров.....	153
7.3.3 Разработка ограничителей иммитанса.....	154
7.3.4 Исследования влияния паразитных иммитансов на передаточную характеристику ограничителя иммитанса.....	157
7.4 Устройство определения характера реактивности иммитанса нагрузки	161
7.4.1 Аналитическое обоснование принципа построения индикатора характера реактивности нагрузки.....	161
7.4.2 Техническая реализация и методика применения	165
7.5 Измерение передаточной характеристики	167
7.5.1 Измерение передаточной характеристики элемента «НЕ».....	167
7.5.2 Измерение передаточной характеристики R -элемента «ИЛИ»....	170
7.6 Измерение быстродействия.....	171
7.7 Измерение запаса устойчивости иммитансного логического элемента.....	172
7.7.1 Аналитическое обоснование метода.....	172
7.7.2 Аналитическая оценка условия обеспечения устойчивости ИЛЭ	174
7.7.3 Реализация метода измерения и его численная проверка.....	175
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	182

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

БТ – биполярный транзистор
ВИП – видеоимпульсно-иммитансный преобразователь
ИИ – инвертор иммитанса
ИЛ – измерительная линия
ИЛЭ – иммитансный логический элемент
ИУ – информационное устройство
КИ – конвертор иммитанса
ЛЭ – логический элемент
ОИП – оптоиммитансный преобразователь
ОЛЭ – оптоиммитансный логический элемент
ОПИ – обобщенный преобразователь иммитанса
ОТ – однопереходной транзистор
ОУ – операционный усилитель
ПИ – преобразователь иммитанса
ПТ – полевой транзистор
ПТШ – полевой транзистор Шоттки
ПТШ2 – двухзатворный полевой транзистор Шоттки
СВЧ – сверхвысокие частоты
УВЧ – ультравысокие частоты

ВВЕДЕНИЕ

При построении логических элементов и информационных устройств на их основе в качестве информационного параметра возможно использование следующих параметров: постоянного тока и напряжения; амплитуды, частоты или фазы переменного тока; амплитуды светового потока, а также не электрических параметров, например: давления газа в пневмоавтоматике или жидкости в гидросистемах.

Приоритетное применение в современной вычислительной технике в качестве информационного параметра находят импульсы постоянного тока или напряжения. Но основные информационные потоки проходят по радиоканалам, включая радио, телевидение, связь, GPS, WiFi и др. Для компьютерной обработки этих потоков информации используются преобразователи понижения частоты радиочастотных сигналов, преобразование радиосигнала в аналоговый, а затем и в цифровой видеоимпульсный сигнал. Все эти преобразования приводят к определённой задержке работы информационной системы. В большинстве практических применений такие системы успешно работают и удовлетворяют потребителя. По мере совершенствования специальной техники и роста несущей частоты сигнала, рассмотренные преобразования радиосигналов в видеосигналы для их последующей обработки ограничивают технические возможности систем.

Одним из путей преодоления этих недостатков является разработка элементной вычислительной базы, способной работать на несущей частоте сигнала – радиочастотных логических элементов.

Значительный вклад в развитие этого направления внесли М. С. Нейман, К. Г. Кнорре, В. М. Тузов, Ю. Л. Иваськив, Г. И. Яловега, Г. Л. Земцов, Х. Сорава, А. А. Молчанов, М. А. Раков и др. Предлагаемые ими решения, как правило, использовали нелинейные свойства вакуумных и полупроводниковых приборов, а также классическую волноводную технику, что не нашло широкого применения. Этому также способствовало появление быстродействующих АЦП, способных работать на частотах несколько ГГц. Однако расширение частотного диапазона работы до нескольких десятков и сотен ГГц требует поиска новых технических решений. Одним из таких решений является построение логических элементов, использующих в качестве информационного параметра составляющие иммитанса (полное сопротивление или проводимость), а также совершенствование микрополосковых СВЧ-технологий на основе арсенида галлия и других диэлектрических материалов.

Основой построения таких элементов являются активные и пассивные обобщённые преобразователи иммитанса, имеющие комплексный коэффициент преобразования иммитанса.

В предлагаемой монографии обобщены некоторые прикладные результаты исследований в этом направлении, базирующиеся на теоретиче-

ских основах динамической негатроники, развиваемых в Винницком национальном техническом университете.

Монография состоит из семи разделов.

В первом разделе рассматриваются известные характеристики логических элементов, но они позволяют даже не специалисту в сфере вычислительной техники легко перейти к рассмотрению более специфической информации, которая рассматривается в следующих разделах.

Во втором разделе даётся обоснование иммитансной логики, базирующейся на концепции нечёткого иммитанса.

Третий раздел посвящён анализу методов и средств построения преобразователей иммитанса.

В четвёртом разделе рассматривается теория построения мультииммитансных логических элементов и их практической реализации.

Пятый раздел посвящён вопросам построения моноиммитансных логических элементов и устройств, использующих преобразовательные свойства длинных линий.

В шестом разделе рассмотрены вопросы преобразования оптического сигнала в иммитансный путём использования оптоиммитансных логических элементов.

Учитывая специфику рассматриваемых элементов, предназначенных для работы в СВЧ-диапазоне, в седьмом разделе разработаны методы и средства измерения их основных параметров.

Авторы понимают, что разработанные логические элементы не являются конкурентами современным логическим элементам, использующим видеоимпульсные сигналы, а предназначены для использования в специализированных радиочастотных системах СВЧ диапазона. Из-за ограниченного объёма монографии, а также новизны исследования были не затронуты ряд вопросов, поэтому будем благодарны всем заинтересованным специалистам за полезные рекомендации, которые позволят улучшить дальнейшие наши исследования.

Авторы благодарны ректору Винницкого национального технического университета профессору В. В. Грабко, начальнику КИИЦ А. И. Власюку, редактору С. А. Малишевой, а также ведущему инженеру КИИЦ О. М. Власюк за помощь в скорейшем издании этой монографии.

1 ЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

1.1 Определения

Логические элементы составляют основу устройств цифровой (дискретной) обработки информации и цифровых устройств автоматики. Логические элементы выполняют простейшие логические операции над цифровой информацией. Логическая операция преобразует по определенным правилам входную информацию X в выходную Y .

Основной системой счисления в современных компьютерах является двоичная, в которой используются цифры 1 и 0, а возможных значений логических переменных также два: 1 и 0.

Базовыми логическими элементами, с помощью которых можно реализовать любую логическую функцию являются логические элементы «И», «ИЛИ», «НЕ». С помощью этих элементов можно реализовать любую логическую функцию, описывающую работу устройств компьютера.

Логический элемент «И» (рис. 1.1 а) реализует конъюнкцию (логическое умножение) двух и более логических значений x_i : $y = x_1 \wedge x_2$ либо $y = x_1 x_2$ и для двух значений x_i определяется таблицей истинности (рис.1.1 б).



Рисунок 1.1 – Обозначения (а) и таблица истинности логического элемента «И»

Логический элемент «ИЛИ» (рис. 1.2а) реализует дизъюнкцию (логическое сложение) двух и более логических значений x_i : $y = x_1 \vee x_2$ либо $y = x_1 + x_2$ и для двух значений x_i определяется таблицей истинности (рис. 1.2б).



Рисунок 1.2 – Обозначения (а) и таблица истинности логического элемента «ИЛИ»

Логический элемент «НЕ» (рис. 1.3 а) реализует логическое отрицание или инверсию. Логическое отрицание функции x обозначается $Y = \bar{X}$ и определяется таблицей истинности (рис.1.3 б).



Рисунок 1.3 – Обозначения (а) и таблица истинности логического элемента «НЕ» (б)

На основе рассмотренных основных логических элементов строятся более сложные информационные устройства: триггеры, счетчики, регистры, сумматоры и др.

1.2 Классификация

К настоящему времени разработано большое количество типов функционально полных систем логических элементов. Многообразие принципов, используемых при их построении, приводит к необходимости классификации логических элементов по ряду основных принципов, определяющих особенности их построения и функционирования.

Основным классификационным признаком логического элемента можно считать физический механизм его работы, с помощью которого выполняются логические операции над входными переменными. В этом случае классификацию логических элементов можно представить в виде, показанном на рис. 1.4.

Исходя из физического механизма работы логических элементов, их можно разделить на электронные, оптические, акустические, биохимические, гидравлические, механические, магнитные и пневматические. В настоящее время наибольшее практическое применение получили электронные логические элементы, использующие в качестве информационного сигнала электрический ток. Если в логическом элементе логический уровень задается значением постоянного напряжения или тока, они называются видеоимпульсными логическими элементами и получили широкое применение в современной информационной технике.

Одновременно с видеоимпульсными логическими элементами создаются радиочастотные логические элементы, которые используют в качестве

ве информационного параметра частоту, фазу или амплитуду переменного тока сверхвысоких частот [1, 2].

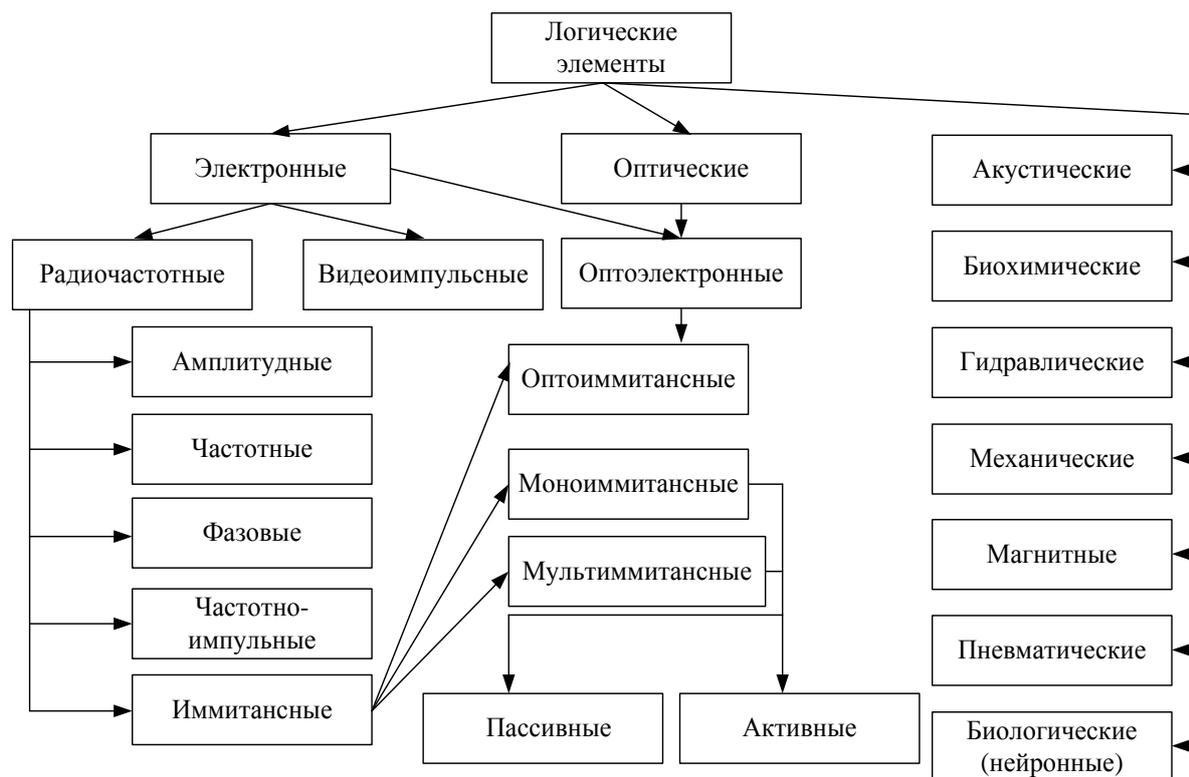


Рисунок 1.4 – Классификация логических элементов

Основой построения выше перечисленных видеоимпульсных и радиочастотных логических элементов являются электронные приборы, работающие в нелинейном режиме, что ограничивает их качество. Этот недостаток отсутствует у радиочастотных иммитансных логических элементов, использующих в качестве информационного параметра иммитанс электрической цепи, подключаемой к входу логического элемента.

Под иммитансом W понимается полное сопротивление (импеданс) $Z = \text{Re}Z + j\text{Im}Z$ или полная проводимость (адмитанс) $Y = \text{Re}Y + j\text{Im}Y$. В основе работы иммитансных логических элементов лежит принцип «нечеткого иммитанса» [3], а их базовой основой являются обобщенные преобразователи иммитанса (ОПИ) [4], работающие в малосигнальном режиме.

1.3 Основные параметры

Большое количество различных типов логических элементов можно характеризовать единой системой основных параметров, к которым относятся [5]:

- коэффициент объединения по входу $K_{об}$, указывающий число входов логического элемента;
- коэффициент разветвления по входу $K_{раз}$, указывающий, на сколько входов логических элементов может быть нагружен выход данного элемента;
- время задержки распространения сигнала $t_{зд}$, характеризующее быстроедействие элементов;
- помехоустойчивость, характеризующая способность логического элемента не изменять состояние при действии сигналов помехи, которые могут возникнуть вследствие различных дестабилизирующих факторов;
- мощность рассеяния логического элемента;
- выходной уровень, соответствующий логической единице и логическому нулю;
- порог переключения схемы;
- диапазон рабочих температур;
- время нарастания и спада фронта выходного сигнала.

Для радиочастотных логических элементов дополнительными параметрами являются:

- центральная рабочая частота f_0 ;
- полоса рабочих частот Δf ;
- запас устойчивости K_y .

2 ИММИТАНСНАЯ ЛОГИКА

2.1 Концепция «нечеткого иммитанса»

Развитие информационной техники определяется двумя направлениями: совершенствованием технологии и элементной базы; использованием новых принципов функционирования и проектирования. Примером таких решений является использование двоичной видеоимпульсной логики. Характерным недостатком является ее статический характер, требующий использования транзисторных ключей в нелинейном режиме, что ограничивает быстродействие и повышает энергопотребление. Частично преодолеть эти недостатки позволяет использование радиочастотных логических элементов. Но отсутствие на первичном этапе их развития современной элементной базы затормозило развитие этого направления, хотя его возможности далеко не исчерпаны. Это подтверждает и развитие глобальных информационных сетей (GPS, мобильная связь, системы наведения и т. д.), реализуемых по радиоканалам [6–9]. В связи с этим, поиск новых технических решений в области обработки информации, передаваемой в виде радиочастотных сигналов, является актуальным. Одним из перспективных решений в этой области является использование концепции «нечеткого иммитанса» при построении иммитансных логических элементов.

При проектировании радиоэлектронных высокочастотных устройств возникает проблема определения или задания численных значений иммитансов: сопротивления – R ; емкости – C ; индуктивности – L . При этом качество результатов проектирования во многом зависит от погрешности задания или расчета значений RLC -компонентов. Наиболее характерным примером такой зависимости является влияние значения иммитанса нагрузки W_n и генератора W_r при определении иммитансных W -параметров активных четырехполюсников на высоких и сверхвысоких частотах. Например, обеспечение условий: $Z_n = Z_r = 0$ (режим КЗ) при измерении Y -параметров четырехполюсников, вследствие влияния паразитных индуктивностей выводов, практически невозможно, что приводит к росту погрешности измерений с ростом частоты. Аналогичная проблема возникла и при измерении Z -параметров, требующая обеспечения фиксированных сопротивлений $Z_r = Z_n = \infty$ (режим ХХ), что вследствие влияния паразитных емкостей между выводами и общей шиной также невозможно реализовать. Все эти недостатки привели к увеличению погрешностей измерений Y - и Z -параметров на частоте 1 ГГц более чем на 20 %, что определило отказ от измерения и использования Y - и Z -параметров на сверхвысоких частотах.

Альтернативой этих измерений явились измерения S -параметров таких четырехполюсников [10], которые должны осуществляться в режиме двух-

стороннего согласования и обеспечение выполнения условий: $Z_H = Z_0$, $Z_T = Z_0$, где Z_0 – волновое сопротивление измерительного тракта, т. е. когда Z_H и Z_T – являются постоянными величинами, что, как и при измерении Y - и Z -параметров, является практически невыполнимым. Это связано с несовершенством соединительных элементов измерительного тракта и трансформирующими свойствами линий передачи. Когда, например, сопротивления Z_T и Z_H отличаются от волнового сопротивления на расстоянии $\lambda/4$ от клемм четырехполюсника, это приводит к изменению знака реактивной составляющей сопротивления в плоскости клемм измеряемого четырехполюсника, а, следовательно, и к росту погрешностей измерения S -параметров с ростом частоты. Другой недостаток измерений S -параметров проявляется при измерении S -параметров транзисторов, которые в диапазоне СВЧ являются потенциально неустойчивыми. В результате их входной $W_{вх}$ (выходной $W_{вых}$) иммитанс при определенных нагрузках может попасть в область, где $\text{Re}W_{вх}$ ($\text{Re}W_{вых}$) < 0 (рис. 2.1), что приводит к неконтролируемому возбуждению экспериментальной установки и, как следствие, к росту погрешности измерений.

Преодоление этих недостатков достигнуто за счет отказа на этапе измерений Y -, Z - и S -параметров от необходимости выполнения условий: $W_H = \text{const}$, $W_T = \text{const}$. Предложен метод измерения W -параметров в режиме, когда: $W_H = \text{var}$, $W_T = \text{var}$ и не контролируется по величине, т. е. являются произвольными. Такой метод получил название метода «плавающей нагрузки» и позволил осуществлять измерение W -параметров активных четырехполюсников, в том числе и потенциально-неустойчивых, во всем СВЧ диапазоне с погрешностью менее 20 % [10].

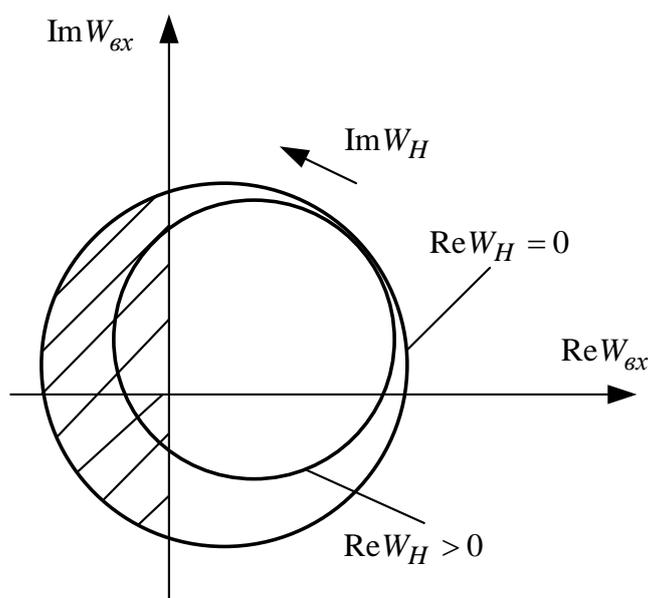


Рисунок 2.1 – Иммитансная окружность потенциально-неустойчивого четырехполюсника (//// – область неустойчивости, где $\text{Re}W_{вх} < 0$)

Подобное решение, заключающееся в отказе от использования на этапе функционального синтеза радиоэлектронных устройств численных фиксированных значений RLC-параметров, осуществлено в [11], где разработаны таблицы преобразования иммитанса однопараметрических обобщенных преобразователей иммитанса (ОПИ) на базе биполярных и полевых транзисторов, позволяющие использовать только качественные (нечеткие) значения преобразуемого $W_n (W_r)$ и преобразованного $W_{вх} (W_{вых})$ иммитансов.

Таким образом, на основании рассмотренных примеров следует, что отказ от использования количественной характеристики иммитанса, на определенном этапе разработки, и переход к качественной оценке, которую в общем случае можно рассматривать как использование нечеткого иммитанса, позволяет достигнуть преимуществ (в частности, упростить методику синтеза, расширить диапазон измерения и др.).

Аналогичный пример использования на определенном этапе качественной оценки вместо количественной широко известен в виде теории и методов нечетких множеств, предложенных Заде [12] и получивших в настоящее время применение в различных областях научных исследований. Это позволило предположить, что введение концепции «нечеткого иммитанса» в дальнейшем также приведет к получению новых результатов как в методах проектирования (разработки) электронных устройств, так и по созданию новых типов устройств, в частности иммитансных логических элементов.

Таким образом, концепция «нечетких иммитансов» предусматривает использование на определенном этапе качественных иммитансных характеристик электрической цепи: активное сопротивление (проводимость) $\pm R(\pm G)$; индуктивность ($\pm L$); емкость ($\pm C$), без их количественной оценки.

2.2 Обоснование иммитансной логики

Прогресс современного общества во многом определяется успехами развития информатики и вычислительной техники, в основе которой лежит булева алгебра, основанная на двоичной форме представления информации. Техническая реализация таких устройств базируется на кодировании информации в виде скачков постоянного тока или напряжения. Учитывая, что такие сигналы получили наименование видеосигналов, логические схемы, которые их используют, можно рассматривать как видеоимпульсные логические схемы. Одновременно с логическими видеоимпульсными схемами, создавались радиочастотные логические схемы, использующие в качестве информационного параметра частоту, фазу или амплитуду гармонических сигналов [1–2]. Их эффективность теоретически, по быстродействию и аппаратными расходам, в случае реализации многозначной логики [13], превышает логические видеоимпульсные схемы двоичной логики. Но

практически из-за отсутствия микроэлектронной базы СВЧ диапазона это направление пока не получило широкого распространения.

Еще одним перспективным направлением построения логических схем является использование оптических логических схем. Они также теоретически имеют ряд существенных преимуществ и потенциальных возможностей. Однако их техническая реализация далека от совершенства, например, по таким параметрам, как стоимость, степень интеграции и др.

Проводятся исследования по созданию логических схем на других (неэлектрических) физических эффектах (акустических, пневматических, химических и т. д.), которые считаются актуальными, поскольку достигнутые на сегодняшний день высокие технические параметры логических видеоимпульсных схем при их дальнейшем улучшении подошли к своей технологической границе (по скорости, рассеиваемой мощности). В связи с этим, создание и развитие логических схем на основе нового информационного базиса – иммитанса – открывает перспективу дальнейшего совершенствования радиочастотной информационной техники, в частности специального назначения.

В общем случае, иммитансом любой электрической цепи является комплексная величина, которая имеет действительную и мнимую частотно-зависимые части.

Действительная часть является дифференциальным параметром: сопротивлением $R = \operatorname{Re} Z = \partial u / \partial i$, или проводимостью $G = \operatorname{Re} Y = \partial i / \partial u$, которые могут быть как положительными $R^{(+)}(G^{(+)}) > 0$, так и отрицательными $R^{(-)}(G^{(-)}) < 0$.

Мнимая часть также является дифференциальным параметром и характеризуется дифференциальной емкостью $C = 1/p \operatorname{Im} Z = \operatorname{Im} Y / p$ или дифференциальной индуктивностью $L = 1/p \operatorname{Im} Y = \operatorname{Im} Z / p$, которые могут быть как положительными $C^{(+)}(L^{(+)}) > 0$, так и отрицательными $C^{(-)}(L^{(-)}) < 0$ [4].

Таким образом, в общем случае состояние электрической цепи на переменном токе можно характеризовать такими дифференциальными параметрами: $R^{(+)}, R^{(-)}, G^{(+)}, G^{(-)}, C^{(+)}, C^{(-)}, L^{(+)}, L^{(-)}$. Исходя из этого, логическое состояние схемы предложено характеризовать не значением тока или напряжения, а характером иммитансного параметра. Согласно концепции «нечеткого иммитанса» можно предложить шесть вариантов иммитансного представления логического «0» и «1» (табл. 2.1) [14]. При этом следует обратить внимание, что соответствующий логический уровень описывается не количественным значением иммитансного параметра, а только его ха-

рактором или знаком, что повышает помехозащищённость предложенной системы.

Таблица 2.1 – Варианты иммитансного представления логического «0» и «1» в мультииммитансных логических элементах

Вариант 1		Вариант 2		Вариант 3	
Логический уровень	Иммитансный уровень	Логический уровень	Иммитансный уровень	Логический уровень	Иммитансный уровень
Положительная логика					
0	$R^{(-)}$	0	$G^{(-)}$	0	$C^{(+)}$
1	$R^{(+)}$	1	$G^{(+)}$	1	$L^{(+)}$
Отрицательная логика					
0	$R^{(+)}$	0	$G^{(+)}$	0	$L^{(+)}$
1	$R^{(-)}$	1	$G^{(-)}$	1	$C^{(+)}$
Вариант 4		Вариант 5		Вариант 6	
Логический уровень	Иммитансный уровень	Логический уровень	Иммитансный уровень	Логический уровень	Иммитансный уровень
Положительная логика					
0	$L^{(-)}$	0	$C^{(-)}$	0	$C^{(-)}$
1	$L^{(+)}$	1	$C^{(+)}$	1	$L^{(-)}$
Отрицательная логика					
0	$L^{(+)}$	0	$C^{(+)}$	0	$L^{(-)}$
1	$L^{(-)}$	1	$C^{(-)}$	1	$C^{(-)}$

При выборе вариантов не рассматривались комбинации, когда при реализации логических «0» или «1» иммитансный параметр приобретает нулевое значения, поскольку при реальном воплощении этот вариант не реализуется. Учитывая, что не существует реальных электрических цепей, обладающих чисто действительным ($\text{Im}W = 0$) или чисто мнимым ($\text{Re}W = 0$) иммитансом, предложенные в табл. 2.1 варианты являются идеализированными и могут быть реализованы только при определенных допущениях, например, на относительно невысоких частотах, где можно игнорировать мнимой составляющей иммитанса ($\text{Im}W \approx 0$) или при использовании высокодобротного иммитанса, когда $\text{Re}W \approx 0$.

Логические элементы, в которых логические уровни отличаются характером иммитанса или его знаком (см. табл. 2.1) назовем мультииммитансными логическими элементами.

Для практического использования более предпочтительны логические элементы, использующие один вид информационного параметра, например, только активное сопротивление – (R -элемент), емкостной иммитанс – (C -элемент) или индуктивный иммитанс – (L -элемент). Такие логические элементы являются моноиммитансными элементами [15]. Логические состояния таких элементов можно охарактеризовать диапазоном значений этих параметров (табл. 2.2).

Таблица 2.2 – Варианты иммитансного представления логических «0» и «1» в моноиммитансных логических элементах

Вариант 1		Вариант 2		Вариант 3	
Логический уровень	Иммитансный уровень	Логический уровень	Иммитансный уровень	Логический уровень	Иммитансный уровень
Положительная логика					
0	$R^{(0)} < R_0$	0	$X_L^{(0)} < X_{L0}$	0	$X_C^{(0)} < X_{C0}$
1	$R^{(1)} > R_0$	1	$X_L^{(1)} > X_{L0}$	1	$X_C^{(1)} > X_{C0}$
Отрицательная логика					
0	$R^{(0)} > R_0$	0	$X_L^{(0)} > X_{L0}$	0	$X_C^{(0)} > X_{C0}$
1	$R^{(1)} < R_0$	1	$X_L^{(1)} < X_{L0}$	1	$X_C^{(1)} < X_{C0}$

Например, логической «1» соответствует диапазон изменения $R^{(1)} > R_0$, а логическому «0» – диапазон изменения $R^{(0)} < R_0$ (моноиммитансный логический R -элемент), где R_0 – резистивная граница логического уровня. Аналогично, для емкостного сопротивления: «1» $\equiv X_C^{(1)} > X_{C0}$; «0» $\equiv X_C^{(0)} < X_{C0}$ (моноиммитансный логический C -элемент); для индуктивного сопротивления: «1» $\equiv X_L^{(1)} > X_{L0}$; «0» $\equiv X_L^{(0)} < X_{L0}$ (моноиммитансный логический L -элемент). Значения R_0 , X_{L0} и X_{C0} соответствуют условной границе между иммитансными уровнями, соответствующими логическим «1» и «0».

Исходя из приведенных определений, в общем случае иммитансный логический элемент является преобразователем иммитанса, параметры которого определяют основные технические характеристики иммитансного логического элемента.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Нейман М. С. О сверхвысокочастотной вычислительной прерывной автоматике / М. С. Нейман // Электронные радиоимпульсные вычислительные системы дискретного действия : труды МАИ. – М. : Оборонгиз, 1962. – Вып. 149. – С. 3–8.
2. Кнорре К. Г. Фазовые и частотные СВЧ элементы / К. Г. Кнорре, В. М. Тузов, Г. И. Шур. – М. : Советское радио, 1975. – 352 с.
3. Лищинская Л. Б. Обоснование концепции нечеткого иммитанса / Л. Б. Лищинская // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2010. – № 1. – С. 20–25.
4. Філінюк М. А. Основи негatronіки: Том I. Теоретичні і фізичні основи негatronіки / М. А. Філінюк — Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – 456 с.
5. Nikolayev I. Microelectronic devices and fundamentals of their design / I. Nikolayev, N. Filinyuk. – Moscow : MIR, 1989. – 341 p.
6. Леонтьев Б. К. GPS: Все, что Вы хотели знать, но боялись спросить / Б. К. Леонтьев. – К. : Бук-Пресс и К, 2005. – 352с.
7. A Guide to the Global Positioning System (GPS) — GPS Timeline. Radio Shack. Retrieved January 14, 2010.
8. Системы мобильной связи : учебное пособие для вузов / В. П. Ипатов, В. К. Орлов, И. М. Самойлов и др. ; под. ред. В. П. Ипатова. – М. : Горячая линия-Телеком, 2003. – 272 с.
9. Кшиштоф В. Системы подвижной радиосвязи / В. Кшиштоф ; пер. с польск. И. Д. Рудинского под ред. А. И. Ледовского. – М. : Горячая линия – Телеком, 2006. – 536 с.
10. Філінюк М. А. Метрологічні основи негatronіки / М. А. Філінюк, Д. В. Гаврілов. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006, – 188 с.
11. Филинюк Н. А. Активные СВЧ фильтры на транзисторах / Н. А. Филинюк. – М. : Радио и связь, 1987. – 112 с.
12. Zadeh L. A. Fuzzy Sets as a Basis for a Theory of Possibility / L. A. Zadeh // Fuzzy Sets and Systems. – 1978. – V.1, № 1. – P. 3–28.
13. Сигорский В. П. Многоустойчивые элементы дискретной техники / В. П. Сигорский, Л. С. Ситников, Л. Л. Утяков. – Л. : – Энергия, 1966. – 360 с.
14. Ліщинська Л. Б. Імітансна логіка / Л. Б. Ліщинська, М. А. Філінюк // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2010. – № 2(18). – С. 25–31.
15. Моноиммитансные логические RLC-элементы / Н. А. Филинюк, Л. Б. Лищинская, Е. В. Войцеховская, В. П. Стахов // Вісник Хмельницького національного університету. – 2015. – № 3.– С. 117–121.
16. Филановский Н. М. Схемы с преобразователями сопротивления / Н. М. Филановский, А. Ю. Персианов, В. К. Рыбин. – Л. : Энергия, 1973. – 192 с.
17. Бессонов Л. А. Линейные электрические цепи / Л. А. Бессонов. – М. : Высшая школа, 1983. – 336 с.

18. Філінюк М. А. Аналіз і синтез інформаційних пристроїв на базі потенційно-нестійких узагальнених перетворювачів імітансу / М. А. Філінюк. – Вінниця : ВДГУ, 1998. – 85 с.
19. Богачев В. М. Транзисторные усилители мощности / В. М. Богачев, В. В. Никифоров. – М. : Энергия, 1978. – 344 с.
20. Ионкин П. А. Синтез RC-схем с активными невзаимными элементами / П. А. Ионкин, В. Г. Миронов. – М. : Энергия, 1976. – 240 с.
21. Хейнлейн В. Е. Активные фильтры для интегральных схем / В. Е. Хейнлейн, В. Х. Холмс. – М. : Сов. радио, 1975. – 288 с.
22. Бенинг Ф. Отрицательное сопротивление в электронных схемах / Бенинг Ф. – М. : Сов. радио, 1975. – 288 с.
23. Знаменский А. Е. Активные RC-фильтры / А. Е. Знаменский, И. Н. Теплюк. – М. : Связь, 1970. – 280 с.
24. Маклюков М. И. Инженерный синтез активных RC-фильтров низких и инфранизких / М. И. Маклюков. – М. : Энергия, 1971, – 184 с.
25. Хьюлсман Л. П. Активные фильтры / Л. П. Хьюлсман. – М. : Мир, 1972. – 318 с.
26. Yanagisava T. Current inversion type negative impedance converters / T. Yanagisava // Inst. Elec. Commun. Engrs. – 1956. – V. 39. – P. 933–937.
27. Pfordlen D. Active RC-filter fur tantal-dunnfilm-schal-tungstechnik / D. Pfordlen // Frequens Bd. – 1964. – № 5. – P. 150–155.
28. Karp M. A. A transistor d-c negative immittance converter / M. A. Karp // Proc. Nat. Electronics. Conf. – 1956. – P. 469–480.
29. Hakim S. Some new negative impedance converters / S. Hakim // Electronics letter. – 1965. – V.1, № 1. – P. 9–10.
30. Filinyk N. A. Short Historical Review of Development of Scientific Brench «Negatronics» / N. A. Filinyk, A. A. Lazarev. // International Journal of Electronics and Communications (AEV). – 2014. – № 68. – P. 172–177.
31. Triple 1,5 GHz. Op. Amp. Analog Devices // Inc. One Technology Way. – Norwood, USA, 2008. – 16 p.
32. Gregorescu I. Impedance converters / I. Gregorescu // Rom. Journ. Phys. – 2008. – V. 53, № 1–2. – P. 115–119.
33. Patent USA № 29080, H03H 7/00, H03H 11/00. Compensated transformer circuit utilizing negative capacitance simulating circuit / F. I. Nino, 1976. – 10 p.
34. Лазарев О. О. Аналіз методів та засобів з схемотехнічної реалізації негатронів на перетворювачах імпедансу / О. О. Лазарев, Л. Б. Ліщинська, О. В. Войцеховська // Вісник Хмельницького національного університету. – 2011. – № 6. – С. 49–55.
35. Smith K. C. The current converters. – a new circuit building block / K. C. Smith // Proc. IEEE. – 1968. – V.56. – P. 1368–1369.
36. Sedra A. S. A second-generation current conveyor and its application / A. S. Sedra, K. C. Smith // IEEE Transactions on Circuit Theory. – 1970. – V. CT-17. – P. 132–134.

37. Fabre A. Third generation current conveyor: a new helpful active element / A. Fabre // *Electronics Letters*. – 1995. – V.31. – P. 338–339.
38. Lee T. H. From oxymoron to mainstream: the evolution and future of RF CMOS / T. H. Lee // *IEEE International Workshop, RFII-Radio-Frequency Integration Technology*. – 2007. – P. 1–7.
39. Критериальная оценка эффективности токовых конвейеров / Н. А. Филинюк, А. А. Лазарев, Л. Б. Лищинская, В. П. Стахов // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2013. – Т. 4, № 8(64). – С. 17–21.
40. Dill H. G. Inductive semiconductor elements and their application in bandpass amplifiers / H. G. Dill // *IRE Transactions on military electronics*. – 1961. – V. MIL-5. – P. 239–250.
41. Adams D. K. Filtering frequency multiplexing and other microwave applications with inverted-common-collector transistor circuits / D. K. Adams, R.Y.C. Ho // *Intern. Microwave symp.* – 1969. – P. 14–20.
42. Філінюк М. А. Інформаційні пристрої на основі потенційно-нестійких багато-електронних напівпровідникових структур Шоткі / М. А. Філінюк, О. М. Куземко, Л. Б. Ліщинська. – Вінниця : ВНТУ, 2009, – 274 с.
43. Ліщинська Л. Б. Багатопараметричні узагальнені перетворювачі імітансу на основі однокристальних напівпровідникових структур : монографія / Л. Б. Ліщинська. – Вінниця : ВНТУ, 2012. – 244 с.
44. Ліщинська Л. Б. Інформаційні пристрої на основі багатопараметричних узагальнених перетворювачів імітансу : монографія / Л. Б. Ліщинська. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 219 с.
45. Филинюк Н. Информационные устройства на комбинированных динамических негатронах. Негатроника. Прикладные аспекты / Н. Филинюк, Е. Войцеховская, Л. Лищинская. – Saarbrucken: LAMBERT Academic Publishing, 2013. – 153 с.
46. Лебедев И. В. Техника и приборы СВЧ / И. В. Лебедев. – М. : Высш. школа, 1970. – Т. 1. – 440 с.
47. Будурис Ж. Цепи сверхвысоких частот / Ж. Будурис, П. Женестье. – М. : Сов. радио, 1979. – 288 с.
48. Речицкий В. И. Акустоэлектронные компоненты и устройства на поверхностных акустических волнах / В. И. Речицкий. – М. : Сов. радио, 1980. – 264 с.
49. Филинюк Н. А. Инжекционно-пролётный транзистор / Н. А. Филинюк, И. В. Булыга // *Микроэлектронные преобразователи и приборы на их основе*. – Баку-Сумгаит, 2007. – С. 95–97.
50. Обобщенные преобразователи иммитанса на основе инжекционно-пролётной транзисторной структуры с общим истоком / Л. Б. Лищинская, И. В. Булыга, А. Г. Шведюк, Н. А. Филинюк // *Наукові праці ВНТУ*. – 2008. – № 2. – С. 1–18.
51. Викулин И. М. Физика полупроводниковых приборов / И. М. Викулин, В. И. Стафеев – М. : Сов. Радио. – 1980. – 296 с.

52. Ліщинська Л. Б. Оцінка основних параметрів імітансних логічних елементів / Л. Б. Ліщинська // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2011. – № 3. – С. 45–52.

53. Музыка З. Н. Чувствительность радиоприемных устройств на полупроводниковых приборах / З. Н. Музыка. – М. : Радио и связь, 1981. – 168 с.

54. Rollett J. Stability and power gain invariants of linear two-ports / J. Rollett // IRE Trans. Circuit Theory. – 1962. – V. CT-9, № 3. – P. 29–32.

55. Lishchinskaya L. B. Estimation of the Noise Immunity of Imittance Logic Elements / L.B. Lishchinskaya // Journal of Communications Technology and Electronics. – 2013. – V. 58, No. 11. – P. 1096–1101.

56. Пат. 99776 Україна, МПК H03K 19/20. Моноімітансний логічний елемент «НІ» / О. В. Войцеховська, М. А. Філінюк, Л. Б. Ліщинська, В. Л. Ковальський, заявник і патентовласник ВНТУ. – u201413750 ; заявл. 22.12.14 ; опубл. 25.06.15, Бюл. № 12.

57. Моноімітансний логічний R-елемент «НІ» / [М. А. Філінюк, Л. Б. Ліщинська, О. В. Войцеховська, В. П. Стахов] // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2015. – № 2 (33). – С. 71–76.

58. Smith Ph. Electronics applications of the smith chart / Smith Ph. – 2nd, BK&Acc., 1955 – 264 p.

59. Пат. 103630 Україна, МПК H03K 19/20. Моноімітансний логічний R-елемент «І» / М. А. Філінюк, Л. Б. Ліщинська, О. В. Войцеховська, В. П. Стахов, заявник і патентовласник ВНТУ. – u201505870 ; заявл. 15.06.15 ; опубл. 25.12.15., Бюл. № 24.

60. Пат. 103310 Україна, МПК H03K 19/20. Моноімітансний логічний R-елемент «АБО» / М. А. Філінюк, Л. Б. Ліщинська, О. В. Войцеховська, В. П. Стахов, заявник і патентовласник ВНТУ. – u201505869 ; заявл. 15.06.15 ; опубл. 10.12.15., Бюл. № 23.

61. Моноиммитансные логические RLC-элементы / [Н. А. Филинюк, Л. Б. Лищинская, Е. В. Войцеховская, В. П. Стахов] // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – 2015. – № 3(225). – С. 117–122.

62. Жан М. Рабаи. Цифровые интегральные схемы. Методология проектирования / Жан М. Рабаи, Ананта Чандракасан, Боривожд Николич // Digital Integrated Circuits. – М. : Вильямс, 2007. – 912 с.

63. Семенов А. С. Интегральная оптика для систем передачи и обработки информации / А. С. Семенов, В. Л. Смирнов, А. В. Шмалько. – М. : Радио и связь, 1990. — 224 с.

64. Юдицкий С. А. Пневматические системы управления приводом машин-автоматов / С. А. Юдицкий. – М. : Энергия, 1968. – 88 с.

65. Темный В. П. Основы гидроавтоматики / В. П. Темный. – М. : Наука, 1972. – 173 с.

66. Билык Р. В. Бесконтактные элементы и системы телемеханики с временным разделением сигналов / Р. В. Билык, Е. С. Соцков. – М. : 1964. – 415 с.

67. Microwave imittance logical elements / L. B. Lishchynska, N. A. Filinyuk, R. Y. Chekhmestrouk, Y. S. Rozhkova // 22st International

Crimean Conference: Microwave and Telecommunication Technology, CriMiCo 2012. – Sevastopol, Ukraine, 2012. – P. 137–138.

68. Фрадин А. З. Измерения параметров антенно-фидерных устройств / А. З. Фрадин, Е. В. Рыжков. – М. : Связь, 1972. – 352 с.

69. Bhattacharya J. Rudiments of Computer Science / J. Bhattacharya // Academic Publishers. – 2010.

70. Новиков Ю. В. Введение в цифровую схемотехнику. Курс лекций. / Ю. В. Новиков. – М. : Интернет-университет информационных технологий, 2006. – 343 с.

71. Оптоэлектронная схемотехника / В. П. Кожемяко, О. Г. Натрошвили, Т. Б. Мартинюк, Л. Ш. Имнаишвили. – К. : УМК ВО, 1988. – 276 с.

72. Лищинская Л. Б. Основы построения оптоиммитансной логики / Л. Б. Лищинська // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2011. – № 2(22). – С. 89–95.

73. Филинук М. А. Оптонегатроника : монография / М. А. Филинук, С. Є. Фурса. – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 204 с.

74. Пат. 71411 Україна, МПК H03K 19/20. Оптоімітансний логічний елемент «АБО» / Л. Б. Лищинська, С. Є. Фурса, О. О. Лазарев, М. А. Филинук, заявник і патентовласник ВНТУ. – u201200212 ; заявл. 06.01.12 ; опубл. 10.07.12., Бюл. № 13.

75. Лищинская Л. Б. Оптоиммитансные преобразователи / Л. Б. Лищинская // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2012. – № 1(23). – С. 73–79.

76. Касимов Ф. Д. Физико-технические и схемотехнические особенности проектирования кремниевых микроэлектронных преобразователей на основе негatronов / Ф. Д. Касимов, Ф. Г. Агаев, Н. А. Филинук. – Баку : ЭЛМ, 1999. – 234 с.

77. Филинук Н. А. Анализ метрологического обеспечения, разработки и применения иммитансных логических элементов / Н. А. Филинук, Л. Б. Лищинская, Р. Ю. Чехмestрук // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – 2014. – № 2 (211). – С. 251–255.

78. Филинук Н. А. Пассивные ограничители иммитанса / Н. А. Филинук, Л. Б. Лищинская, Р. Ю. Чехмestрук // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2015. – № 2–3. – С. 3–9.

79. Филинук М. Пристрій визначення характеру реактивності імітансу навантаження довгої лінії / М. Филинук, Л. Лищинська, Р. Чехмestрук // Метрологія та прилади. – 2014. – № 1. – С. 47–50.

80. Пат. 91731 Україна, МПК H03K 19/20. Радіочастотний індикатор характеру реактивності навантаження / М. А. Филинук, Л. Б. Лищинська, Р. Ю. Чехмestрук, заявник і патентовласник ВНТУ. – u201402112 ; заявл. 03.03.14 ; опубл. 10.07.14., Бюл. № 13

81. Шварц Н. З. Линейные транзисторные усилители СВЧ / Н. З. Шварц. – М. : Сов. радио, 1980. – 368 с.

И53 **Імітансні** логічні елементи і пристрої : монографія (рос. мовою) / М. А. Філінюк, Л. Б. Ліщинська, О. О. Лазарєв та ін. ; за заг. ред. М. А. Філінюка. – Вінниця : ВНТУ, 2016. – 188 с.

ISBN 978-966-641-680-6

У монографії узагальнені прикладні результати досліджень з розробки елементної обчислювальної бази, що здатна працювати на несучій частоті сигналу – радіочастотних логічних елементів. Основою побудови таких елементів є активні та пасивні узагальнені перетворювачі імітансу, що мають комплексний коефіцієнт перетворення імітансу.

Книга розрахована на науковців та фахівців, аспірантів і студентів, які займаються дослідженням, проектуванням і розробкою інформаційних пристроїв.

УДК 621.38
ББК 32.85

Наукове видання

Філінюк Микола Антонович
Ліщинська Людмила Броніславівна
Лазарєв Олександр Олександрович
Войцеховська Олена Валеріївна
Фурса Світлана Євгеніївна
Чехместрук Роман Юрійович
Стахов Володимир Петрович

ІМІТАНСІ ЛОГІЧНІ ЕЛЕМЕНТИ І ПРИСТРОЇ

(рос. мовою)

Монографія

За заг. редакцією проф. М. А. Філінюка

Редактор С. Малішевська

Оригінал-макет підготовлено Л. Ліщинською

Оригінал-макет обкладинки підготовлено О. Лазарєвим

Підписано до друку 20.12.2016 р.

Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.

Гарнітура Times New Roman.

Друк різнографічний. Ум. др. арк. 10,39.

Наклад 300 (1-й запуск 1–75) пр. Зам № 2016-241.

Вінницький національний технічний університет,
КІВЦ ВНТУ.

21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ВНТУ,
ГНК, к. 114.

Тел. (0432) 59-85-32.

publish.vntu.edu.ua; *email*: kivc.vntu@gmail.com.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті,
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі,

21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,

ВНТУ, ГНК, к. 114.

Тел. (0432) 59-81-59.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.