**АКТИВНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ**

**СОПРОТИВЛЕНИЯ**

**Назначение и виды преобразователей сопротивлений.** Активные преобразователи сопротивлений предназначены для смены значения или характера сопротивлений или проводимостей пассивных двухполюсных элементов: резистивных, индуктивных или емкостных [1,9,10,11]. К таким преобразователям относят конверторы и инверторы сопротивле­ний и проводимостей. Схема активного преобразователя сопротивле­ний или проводимостей приведена на рис. 10.1,а.

Конвертором сопротивления называют активный четырехполюс-ник, преобразующий некоторый двухполюсник с сопротивлением Zн в двухполюсник с сопротивлением Zвх=±γZн, где γ – вещественная положительная величина, называемая коэффициентом конверсии. Аналогично конвертором проводимости называют четырехпо­люс­ник, который преобразует двухполюсник с проводимостью Yн в двухполюсник с проводимостью Yвх = ±γYн.



 Рис.10.1. Схема активного преобразова-теля сопротивлений и проводимостей (а) и вольтамперная характеристика элемента с

 отрицательным сопротивлением (б)

Инвертором (гиратором) сопро­тивления называют активный четы­рехполюсник, который преобразует пассивный двухполюсник с соп­ротивлением Zн в двухполюсник с сопротивлением , где -сопротивление инверсии (или сопротивление гирации). Анало­гич­но инвертором проводимости называют четырехполюсник, который преобразует двухполюсник с проводимостью  в двухпо­люсник с проводимостью .

Идея инвертора сопротивления была предложена в 1948 году Бернардом Теллегеном. Основное применение гираторов заключается в создании участков цепи, имитирующих индуктивность. Поскольку катушки индуктивности далеко не всегда могут применяться в электрических цепях, использование гираторов позволит обходиться без катушек.

Из определения конвертора сопротивления следует, что входное сопротивление четырехполюсника с нагрузкой  может быть как положительным, так и отрицательным. При этом конвертор положительного сопротивления изменяет только значение сопротивлениядвухполюсника нагрузки, а конвертор отрицательного сопротивления меняет не только значение, но и знак.

Сопротивление бывает положительным, если с возрастанием тока в нем растет и падение напряжения. Если же с ростом тока падение напряжения на сопротивлении уменьшается, то оно является отрица­тельным. Отрицательной может быть и проводимость двухполюсника.

Вольтамперная характеристика одного из таких сопротивлений приведена на рис.10.1,б. Отрицательным это сопротивление является в области Б, где с ростом приложенного напряжения ток умень­шает­ся. Если включить отрицательное сопротивление в цепь пос­ледова­тельно с положительным, то увеличение тока в этой цепи будет вызывать уменьшение падения напряжения на отрицательном сопротивлении и увеличение напряжения на положительном. При этом сумма падений напряжений на положительном и отрицательном сопро­тивлениях будет постоянной, а увеличение мощности, расходуемой в положительном сопротивлении, компенсируется мощностью, вноси­мой отрицательным сопротивлением. Таким образом, отрицательное сопротивление не расходует энергию, а как бы вносит свою энергию в цепь, поэтому оно и названо отрицательным. В действительности в цепях с отрицательным сопротивлением используется только энергия имеющихся в них источников, а отрицательное сопротивление выполняет ее перераспределение между элементами цепи.

**Моделирование преобразователей сопротивлений и прово­ди­мостей.** Наиболее часто конверторы сопротивлений и проводимос­тей реализуются на управляемых источниках напряжения или тока. Схема конвертора сопротивления с управляемым источником напря­же­ния приведена на рис.10.2,а. В этой схеме управляемый источник



Рис.10.2. Модель конвертора cопро­тивления с управляемым источником напряжения (а) и модель конвертора про-водимости с управляемым источни

 ком тока (б)

напряжения  соединен последовательно с сопротивлением наг­рузки , а уравнения схемы имеют вид:

 ** .** (10.1)

Входное сопротивление такой схемы определяется выражением:



 (10.2)

Таким образом, коэффициент конверсии имеет значение:



 (10.3)

Если , то рассмотренная схема является конвертором отрицательного сопротивления, если же , то схема становится конвертором положительного сопротивления. При резистивной нагрузке конвертора  входное сопротивление будет положи­тель­ным при  и отрицательным при .

Если нагрузка имеет индуктивный характер , то входное сопротивление также оказывается индуктивным:

 

При  входная индуктивность конвертора становится отрицательной (). Таким образом, одна и та же схема, приведенная на рис 10.2,а, при различных значениях коэффициента передачи  четы­­рехполюсника может быть конвертором положи­тель­ного или отрицательного сопротивления.

Аналогичные результаты получаем при использовании в четырехполюснике источника тока, управляемого током, как показа­но на рис 10.2,б. Так как в этой схеме управляемый источник вклю­чен параллельно нагрузке, то уравнения схемы имеют вид**:**

****

 (11.4)

Входная проводимость схемы имеет значение



 (11.5)

где  – коэффициент передачи управляемого источника по току.

При  > 1 входная проводимость становится отрицательной, поэ­тому схема будет конвертором отрицательной проводимости.

Так, например, если нагрузка четырехполюсника имеет веще­ственный характер , то входная проводимость

будет отрицательной и вещественной.

Если нагрузка имеет емкостной характер , то входная про­водимость также будет емкостной, а сама входная емкость при  > 1 будет отрицательной (). При  < 1, входная емкость будет по­ло­­­жи­тельной.

Таким образом, использование конверторов сопротивлений и про­­­водимостей позволяет изменять масштаб положительных сопро­тив­лений, проводимостей, индуктивностей и емкостей, делая их отри­цательными, положительными или равными нулю.

Некоторых пояснений требуют понятия отрицательной емкости и отрицательной индуктивности. Положительная емкость (просто ем­кость) имеет комплексную проводимость , где угол 90о ука­зы­вает, что ток опережает напряжение на 90о. В отрицательной ем­ко­сти сохраняется та же частотная зависимость проводимости, но изменяется сдвиг фаз между напряжением и током, т. е. ток отстает от напряжения на угол, равный 90о.

Положительная индуктивность (просто индуктивность) имеет комплексное сопротивление , где угол 90о указывает, что напряжение опережает ток на 90о. В отрицательной индуктивности сохраняется тот же вид частотной зависимости сопротивления, но изменяется сдвиг фаз между током и напряжением, т. е. напряжение отстает от тока на 90о. Иначе говоря, частотные зависимости у отри­ца­тельной емкости и отрицательной индуктивности такие же, как у положительных, а сдвиги фаз отличаются на 180о.

Например, если положительную емкость подключить парал­ле­ль­но отрицательной емкости, то при равенстве их абсолютных значений полная емкость такого соединения будет равна нулю. Если же после­до­вательно соединить отрицательную индуктивность и положитель­ную индуктивность, имеющие одинаковые абсолютные значения, то полная индуктивность такого соединения также будет равна нулю.

Инверторы сопротивлений и проводимостей также можно по­строить на управляемых источниках напряжения или тока. Схема ин­вер­тора сопротивления на двух источниках напряжения, управляе­мых током, приведена на рис.10**.3,а.**

****

 Рис.10.3. Модель инвертора сопротивления на уп­рав­ляемых источниках напряжения (а) и модель ин­вер­тора проводимости на управляемых источниках

 тока **(б)**

В этой схеме напряжения на зажимах четы­рехполюсника, составленного из двух управ­ляе­­мых источников, имеют значения:



 (10.6)

где – сопротивление прямой передачи управляемых источников, которое одновременно является и сопротивлением инверсии (гирации).

Из уравнения (10.6) найдем входное сопротивление:



 (10.7)

где – сопротивление нагрузки (знак минус введен из-за того, что ток и напряжение на нагрузке имеют различное сопротив­ле­ние).

Схема, приведенная на рис 10.3,а, соответствует инвертору (гира­тору) положительного сопротивления. Если же поменять направление только одного из управляемых источников напряжения, то изменится знак у одного из напряжений в уравнениях (10.6) и сопротивление



 (10.8)

примет отрицательное значение. В этом случае схема будет соответ­ствовать инвертору (гиратору) отрицательного сопротивления.

Аналогичные результаты получаем при использовании двух ис­точ­ников тока, управляемых напряжением. Схема инвертора прово­ди­мости с двумя управляемыми источниками тока приведена на рис 10.3,б. В этой схеме токи управляемых источников имеют значения:

  (10.9)

где Yг – проводимость прямой передачи источников, которая и яв­­ляется проводимостью инверсии.

Из уравнения (10.9) находим входную проводимость схемы:



 (10.10)

где – проводимость нагрузки.

Схема, приведенная на рис 10.3,б, соответствует инвертору (ги­ратору) положительной проводимости. Если поменять направ­ление только одного из управляемых источников тока, то изменится знак у одного из токов в уравнениях (10.9) и проводимость

  (10.11)

примет отрицательное значение. В этом случае схема, приведенная на рис. 10.3,б, будет соответствовать инвертору отрицательной проводи­мости. Самым распространенным применением инверторов сопро­ти­в­­ле­ний и проводимостей является создание на их основе ем­костных аналогов индуктивности. В связи с тем, что изготовление ем­кости про­ще, чем изготовление индуктивности, этот способ изготов­ления индуктивностей находит самое широкое применение, особенно в микроэлектронике. Так, например, если в схеме рис.10.3,а исполь­зо­вать емкостную нагрузку , то входное сопротивление ин­вер­тора будет индуктивным, а эквивалентная индуктивность будет иметь значение

 , (10.12)

где Rг– вещественное сопротивление инверсии.

При помощи инверторов сопротивлений можно построить без­ин­дуктивные резонансные контуры, различные безиндуктивные филь­тры, интеграторы напряжения и многие другие устройства. В таких устройствах отсутствуют многие нежелательные факторы, свя­занные с несовершенством катушек индуктивности: насыщение фер­ромаг­нитных сердечников, потери на гистерезис и вихревые токи, большие габариты и масса катушек. Инверторы сопротивлений с ем­костной нагрузкой имеют реактивный (индуктивный) характер вход­ного сопротивления, поэтому такой инвертор не потребляет энергию из цепи, к которой он подключен.

**Реализация конверторов сопротивлений на управляемых источниках.** При построении конверторов сопротивлений на управляемых источниках напряжения с использованием модели, приведенной на рис.10.2,а, в качестве управляемого источника можно использовать, например, операционный усилитель, выполнив на нем усилитель с ограниченным усилением. Схема такого усилителя без инверсии входного сигнала приведена на рис.10.4,а, а с инверсией – на рис.10.4,б.

 ******

Рис.10.4. Схемы неинвертирующего усилителя с ограниченным усилением ОУ (а), инвертирующего усилителя (б) и условное обозначение неинвер­­тирую-

 ­­щего усилителя (в) и инвертирующего усилителя (г)

Коэффициент усиления по напряжению для схемы, приведенной на рис.10.4,а, определяется по формуле 

а для схемы, приведенной на рис.10.4,б , 

Условные схематические обозначения усилителей с ограничен­ным усилением приведены на рис.10.4,в и г.

 С помощью таких усилителей можно легко организовать кон­вер­­­торы отрицательной и положительной емкости, схемы которых приведены на рис.10.5. Для схемы конвертора отрицатель­ной емкости, изображенной на рис.10.5,а, входная емкость может быть найдена по формуле 

а для схемы конвертора положительной емкости, изображенной на рис.10.5,б, – по формуле 

Так, например, при R1=R2 для схемы конвертора (рис.10.5,а) по­лучаем Cвх=-Сн, т. е. емкость на входе конвертора изменяет знак, не изменяя значения.

Рис.10.5. Схемы конвертора отрицатель-

 ной (а) и положительной (б) емкостей

Другой тип конверторов сопро­тив­ления можно создать на базе источников тока, управляемых током. Простейшим устройством такого типа является биполярный транзистор. В соответствии со схемой такого конвертора (рис.10.2,б) нагрузка должна подключаться параллельно управляемому источнику тока. Упрощенная схема тако­го конвертора приведена на рис 10.6,а. Так как нагрузка Zн включена в эмиттер, то схема является эмиттерным повторителем напряжения, схема замещения которого приведена на рис.10.6,б.

 Уравнения для схемы замещения рис.10.6,б имеют вид:



Из этих уравнений получаем входное сопротивление эмиттерного повторителя с нагрузкой:



 (10.13)

 Рис.10.6. Упрощенная схема конвертора сопротивления на эмиттерном повторителе

 (а) и его схема замещения (б)

Таким образом, эмиттерный повторитель является конвертором сопротивления с коэффициентом конверсии . Основным недо­статком такого конвертора является неуправляемый коэффициентконверсии.

**Реализация инверторов сопротивления на управляемых источниках.** При построении инверторов сопротивления на источниках тока, управляемых напряжением, используют уравнения (10.9). Схема инвертора на управляемых источниках тока приведена на рис.10.7,а. Источники тока, управляемые напряжением, можно построить на операционных усилителях или полевых транзисторах. При использовании полевых транзисторов с управляющим *р-п­*­ пе­­­ре­ходом ток стока определяется напряжением на затворе, а ток затвора ничтожно мал. В результате полевой транзистор можно использовать как источник тока, управляемый напряжением на затворе, для которого .

Схема инвертора сопротивления, построенная на полевых тран­зис­торах, приведена на рис.10.7,б. В этой схеме два полевых транзис­тора включены встречно-параллельно и работают на общую нагрузку .

Рис.10.7. Структурная схема­ инвертора на ис­точ­ни­ках то­ка, управ­ля­емых нап­ряжени­ем (а), и схема ин­вертора на

 полевых тран­зисторах (б)

Инвертор сопротивления, выполненный на источниках напряже­ния, управляемых током, приведен на рис.10.8,а. В этой схеме два ис­точника напряжения, которые управляются током, включены встреч­но-последовательно. Оба управляемых источника могут иметь общую землю, как показано штриховой линией. В качестве источника напря­жения, управляемого током, можно использовать схему на ОУ, при­ве­­денную на рис.10.8,б. Сопротивление прямой передачи такого ис­точ­ника имеет значение , т. е. .



Рис.10.8. Структурная схема инверто­ра сопротивлений на источниках тока, управ­ляемых током (а), и источник напряжений, управляемый током, на операционном

 усилителе (б)

**Устойчивость активных преобразователей сопротивлений.** Существенным недостатком активных преобразователей является их потенциальная неустойчивость.

Электрическая цепь называется устойчивой, если в ней отсутствуют неограниченно нарастающие свободные составляющие напряжения или тока реакции. Так как свободная составляющая реакции представляет собой импульсную характеристику цепи, то при неограниченном нарастании импульсной характеристики с увеличением времени цепь будет неустойчивой. Если же импульсная характеристика цепи стремится к нулю при увеличении времени, то цепь будет устойчивой. Если устойчивую цепь вывести из состояния равновесия при помощи импульсного возмущения, то она вернется в исходное состояние. Неустойчивая цепь после импульсного возмущения в исходное состояние не вернется.

Для обеспечения затухания импульсной реакции цепи необходимо и достаточно выполнить условие устойчивости: «все вещественные полюсы и вещественные части комплексных полюсов входного сопротивления должны быть отрицательными, т. е. лежать в левой полуплоскости комплексной переменной . Если хотя бы один полюс окажется в правой полуплоскости, то соответствующее слагаемое импульсной реакции будет неограниченно расти и цепь будет неустойчивой.»

Например, конвертор сопротивления будет неустойчивым, если его входное сопротивление имеет отрицательную вещественную часть. Конвертор положительного сопротивления при  имеет входное сопротивление с положительной вещественной частью и, следовательно, будет устойчивым. Конвертор отрицательного сопротивления потенциально неустойчив, так как при  входное сопротивление может иметь отрицательную вещественную часть. Если входные зажимы такого конвертора замкнуть накоротко, то он будет устойчивым, так как при напряжении  управляемый источник бездействует. Поэтому конвертор, содержащий источники напряжения, управляемые напряжением, устойчив при коротком замыкании зажимов.

Конверторы проводимости, выполненные по схеме рис.10.2,б, являются потенциально неустойчивыми при . Если входные зажимы такого конвертора разомкнуть, то он будет устойчивым, так как при токе , управляемый источник тока бездействует.

Поэтому конверторы, содержащие источник тока, управляемый током, устойчивы при холостом ходе. При нарушении устойчивости конвертора возникают автоколебания.

Все сказанное об устойчивости конверторов в равной степени относится и к устойчивости инверторов. Инверторы положительных сопротивлений и проводимостей потенциально устойчивы. Их неустойчивость может возникать только из-за наличия паразитных неучитываемых параметров управляемых источников. Инверторы отрицательных сопротивлений и проводимостей потенциально неустойчивы. Если вещественная часть входного сопротивления или проводимости принимает отрицательные значения, то в цепи могут возникнуть автоколебания или триггерные эффекты.

**Применение преобразователей сопротивлений.** Активные преобразователи сопротивлений находят широкое применение в активных фильтрах, различных корректирующих устройствах, при создании селективных усилителей и генераторов и во многих других случаях.

Так, например, гираторы часто используются в микросхемах безиндуктивных полосовых усилителей промежуточной частоты, таких как КФ548ХА1. Эта микросхема, выполненная по планарно-эпитак­сиальной технологии, содержит гираторный фильтр, который выполняет функции нерегулируемого селективного усиления сигналов с частотой 465 кГц и подавления сигналов за пределами полосы пропускания.

Поскольку основные применения гираторов сводятся к созданию эквивалентной индуктивности, то в табл. 10.1 приведены различные варианты гираторных схем замещения соединений индуктивностей. *Таблица 10.1*

**Гираторные схемы индуктивностей**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Исходная схема |  Гираторная схема |  Значение  параметров |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |