

КОМП'ЮТЕРНІ ЗАСОБИ, МЕРЕЖІ ТА СИСТЕМИ

A.D. Bekh, V.V. Chernetsky

HARDWARE METHODS OF THE INCREASE OF THE SENSITIVITY OF ELECTROMAGNETIC VOLTAGE AMPLIFIERS

The main methods of the achievement of high sensitivity of the voltage amplifiers are considered; the circuitry of the selective amplifier with selective filter based on metal volume resonator with sub-noise information signal amplifier is proposed.

Розглянуті основні методи досягнення високої чутливості підсилювачів напруги. Запропонована схема селективного підсилювача зі смуговим фільтром на основі металічного об'ємного резонатора з підсиленням підшумових інформаційних сигналів.

Рассмотрены основные методы достижения высокой чувствительности усилителей напряжения. Предложена схема избирательного усилителя с полосовым фильтром на основе металлического объемного резонатора, обладающего свойством усиления подшумовых информационных сигналов.

© А.Д. Бех, В.В. Чернецкий, 2008

УДК 681.3(031)

А.Д. БЕХ, В.В. ЧЕРНЕЦКИЙ

АППАРАТНЫЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ

Для получения объективной информации о взаимодействии объектов необходимы прямые измерения параметров этого взаимодействия, а канал усиления сигналов и преобразования информации должен обладать высокими эффективностью и быстродействием. Параметры эффективности измерительных средств обусловлены чувствительностью усилительных и решающих устройств, которая определяется минимальной амплитудой входного сигнала, обеспечивающей изменение показателя средства измерения на единицу шкалы или на 1 бит информации цифровых устройств вследствие действия минимального сигнала амплитудой ΔU_c .

Чувствительность усилительных устройств определяется срабатыванием порогового устройства на их выходе от сигнала минимальной амплитуды:

$$\Delta U_c \cdot K_u = U_0, \quad (1)$$

где K_u – коэффициент усиления амплитуды сигнала ΔU_c , которая обеспечивает надежное переключение решающего устройства, характеризующегося пороговым напряжением U_0 . Для повышения чувствительности или снижения ΔU_c необходимо увеличивать K_u или уменьшать U_0 . Возможность снижения U_0 практически отсутствует. В транзисторных усилителях величина U_0 обусловлена особенностями нелинейной зависимости ее от управляющего напряжения транзисторов. Поэтому снижение ΔU_c достигается только увеличением $K_u \gg 1$, т. е. усилением ΔU_c .

Основную роль в измерительном канале играют усилители напряжения, в качестве которых в основном используют операционные усилители. Они характеризуются высокими коэффициентом усиления и входным сопротивлением, в результате чего их можно непосредственно подключить к любому источнику сигналов. Однако назвать их эффективными усилителями напряжения не представляется возможным. Они, как и все электронные усилители напряжения, вместе с его усилением образуют аддитивный шум и усиливают его, учитывая это выражение (1) принимает вид:

$$(\Delta U_c + U_{ш}) K_u \geq U_0. \quad (2)$$

Усилитель должен выполнять функцию не только усиления сигналов, но и выделения их на фоне шумов. Поэтому амплитуда порогового сигнала ΔU_c должна превышать амплитуду и дисперсию амплитуды шумов $U_{ш}$

$$\Delta U_c \geq U_{ш}. \quad (3)$$

Кроме этого электронным усилителем напряжения свойственны температурный и временной дрейфы «нуля» и коэффициента усиления, в результате чего пороговый сигнал ΔU_c должен превышать $U_{ш}$.

Если предположить существование в измерительном канале только принципиально неустранимого шума, то чувствительность усиления определяется из условия:

$$P_{с\ min} = P_{ш}, \quad (4)$$

где $P_{с\ min}$ и $P_{ш}$ – мощность соответственно сигнала и шума. Поскольку измерительный канал представляет собой резистивную цепь, то неустранимым шумом является тепловой шум:

$$P_{ш} = 4 \kappa T F \quad (5)$$

или

$$P_{с\ min} = U_{с\ min}^2 / R = 4 \kappa T F, \quad (6)$$

где κ – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; F – полоса частот преобразуемых сигналов. Следовательно, чувствительность усилительного канала составляет

$$\Delta U_{с\ min} = \sqrt{4 \kappa T F R}. \quad (7)$$

Одним из путей снижения уровня шумов усилительных устройств – охлаждение усилительных схем до температуры жидкого азота. Такой способ используется в аппаратуре специального назначения, но он неприемлем в технике широкого применения. Другой известный способ повышения чувствительности усилительных схем заключается в использовании низкошумящих транзисторов, т. е. в совершенствовании схем усилителей сигналов.

Наиболее широко для достижения высокой чувствительности усиления сигналов в схемах усилителей используются различные фильтры шумов и помех. С целью достижения значительного коэффициента усиления и поглощения шумов вне полосы полезных сигналов используются избирательные усилители. Избирательные свойства таких усилителей обычно обеспечиваются использованием в них различных резонансных систем. Наиболее распространены избирательные усилители высокой частоты, форма резонансной характеристики и избирательность которых определяется резонансной системой. Такие усилители нашли широкое применение в радиоприемных устройствах [1]. Использование избирательных усилителей эффективно в высокочастотной области, в которой полосовые фильтры строятся на основе оптимальных связанных колебательных контуров или фильтров сосредоточенной селекции. В низкочастотных избирательных усилителях используются активные RC -фильтры, которым свойственен высокий уровень собственных шумов, ограничивающих минимальный информационный сигнал, а низкочастотные резонансные LC -фильтры имеют значительные габариты и низкое качество. Наиболее распространенные схемы избирательных усилителей напряжения состоят из двух операционных усилителей (ОУ) и включенного между ними полосового фильтра [2]. В этих усилителях функции усиления по напряжению выполняют ОУ, а полосовой фильтр выполняет функцию подавления шумов и помех вне полосы полезных сигналов и выделения сигналов в необходимой полосе частот. Однако если усиленные шумы первого ОУ подавляются полосовым фильтром, то шумы второго ОУ – генерируются и усиливаются во всей полосе частот усиления.

В созданном нами электромагнитном усилителе напряжения приведенный ко входу уровень шума на несколько порядков ниже, чем в ОУ. В нем также отсутствуют температурный и временной дрейфы нуля и коэффициента усиления, а избирательная полоса частот лежит в низкочастотной области. Чувствительность этого усилителя повышена на несколько порядков, что обеспечивает выделение сигналов в нужной полосе частот амплитудой ниже уровня теплового шума. Такая возможность в усилителе обеспечивается посредством использования низкочастотного шумоподавляющего фильтра, использующего явление энергетического резонанса в электромагнитной системе магнетик-проводник, который по эффективности превышает механические и LC -фильтры, используемые в электроакустике.

Считается, что электрическое поле внутри металла отсутствует, учитывая это, отсутствует и преобразование энергии магнитного поля магнетика в электрическое поле проводника, индуктивно связанного с ним. Исследования показали, что энергия магнитного поля магнетика преобразуется без остатка в энергию электрического поля проводника в электромагнитной системе магнетик-проводник на частоте энергетического резонанса [3]. Открытие явления преобразования форм энергии электрического и магнитного полей в системе магнетик-проводник сделало существенный сдвиг в познании процессов взаимодействия в веществе и поле. Явление преобразования энергии электромагнитных полей едино как для процессов взаимодействия в макро-, так

и в микромире [4]. Например, нервная система человека работает с электромагнитными сигналами, которым не свойственны тепловые шумы. Поэтому она по чувствительности на несколько порядков превосходит электронные системы усиления и обработки информационных сигналов. Устранение взаимных перекрестных шумов и помех между биомеханической и акустической системами человека достигнута посредством разнесения механических и акустических процессов по частотному диапазону. Если акустическая система человека находится в низкочастотной области частот (диапазон звуковых волн), то биомеханическая система занимает инфрочастотный диапазон. Электронная аппаратура для усиления и обработки инфрочастотных сигналов имеет более низкую чувствительность вследствие высокого уровня тепловых шумов в электронных усилителях в инфрочастотном диапазоне. Поэтому создание техники преобразования инфрочастотных сигналов с целью достижения высокой чувствительности и быстрого действия оказалось возможным только после разработки способа построения шумоподавляющих фильтров, использующих явление энергетического резонанса в электромагнитной системе магнетик-проводник.

Добротность Q энергетического преобразователя магнетик-проводник может достичь величины $10^5 - 10^6$. Поэтому он является практически идеальным низкочастотным полосовым фильтром. Причем, подавление шумов в выходном канале усилителя не затрагивает процесс усиления.

Полоса пропускания фильтра равна $F = F_0 / 2Q$. С учетом (7) чувствительность усилительного канала по напряжению составляет:

$$\Delta U_c = \sqrt{2kTF_0R/Q}. \quad (8)$$

Операция пропускания усиливаемых сигналов через полосовой фильтр, использующий явление энергетического резонанса электромагнитной системы магнетик-проводник повышает чувствительность усилительных устройств на несколько порядков и сдвигает ее в область подшумовых нановольтовых сигналов.

В созданном усилителе функцию полосового фильтра выполняет оптимальный трансформатор с плоским короткозамкнутым витком из толстой листовой меди, образующим металлический объемный резонатор (МОР). Усилитель напряжения, схема которого показана на рисунке, содержит два операционных усилителя – ОУ1, ОУ2 и включенный между ними оптимальный трансформатор с МОР. Последний выполняет функции усилителя напряжения и полосового фильтра. Создание оптимального трансформатора с функцией шумоподавляющего фильтра позволило усилению по напряжению выполнять оптимальным трансформатором, а операционные усилители использовать как буферный элемент с единичным коэффициентом усиления по напряжению. В этом усилителе:

- напряжение тепловых шумов не усиливается;
- температурный и временной дрейфы нуля и коэффициента усиления отсутствуют;

- приведенный ко входу уровень шума на несколько порядков ниже, чем в электронных усилителях;
- отсутствует низкочастотный дрейф коэффициента усиления (рисунок).

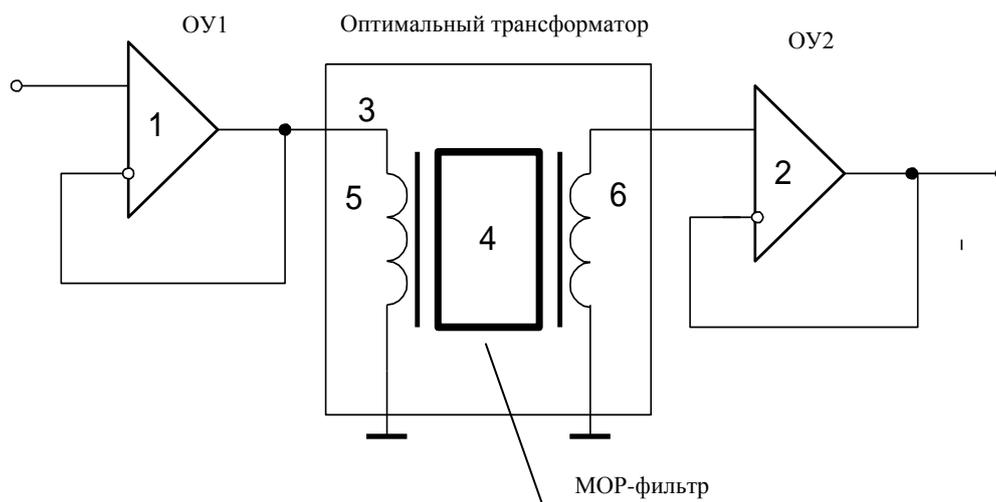


РИСУНОК. Схема электромагнитного усилителя напряжения

Усиление электрических сигналов исключительно низкой интенсивности основывается на генерировании э.д.с. в результате усиления мощности сигнала по току – полупроводниковыми операционными усилителями, а по напряжению – оптимальным трансформатором с большим коэффициентом трансформации, который передает усиленный гармонический сигнал и не вносит фазовых и других искажений. Входной сигнал без искажений с единичным коэффициентом усиления по напряжению передается со входа на выход первого операционного усилителя ОУ1. Высокое входное сопротивление ОУ позволяет подключить ОУ к любому источнику сигналов, а к низкоомному выходу ОУ непосредственно можно подключить обмотку трансформатора. В оптимальном трансформаторе с МОР полезный сигнал необходимой полосы частот усиливается по напряжению, а сигнал и шумы вне этой полосы поглощаются МОР фильтром. Усиленные по напряжению сигналы через второй ОУ2 в функции повторителя напряжения поступают на выход усилителя напряжения. Таким образом, напряжение полезных сигналов усиливается в K_u раз, K_u равен коэффициенту трансформации оптимального трансформатора с МОР, а уровень шумов $U_{ш}$ соответствует уровню шума выходного ОУ с единичным коэффициентом усиления. Приведенный ко входу уровень шумов в K_u раз меньше шума на выходе усилителя. Если уровень шумов на выходе усилителя равен табличному параметру шума ОУ, то на его входе он в K_u раз ниже и составляет $U_{ш\text{ вых}} / K_u$. При коэффициенте уси-

ления $K_u = 10^n$ приведенный ко входу уровень шумов усилителя на n порядков ниже приведенного ко входу шума полупроводниковых ОУ. Кроме этого оптимальному трансформатору не присущи температурный и временной дрейфы коэффициента трансформации. Поэтому в усилителе отсутствует температурный и временной дрейфы нуля и коэффициента усиления.

Основной элемент усиления напряжения сигналов и поглощения шума усилителя – оптимальный трансформатор напряжения с индуктивно связанным с ним металлическим объемным резонатором. Изменение магнитного потока в сердечнике трансформатора эффективно преобразуется в МОР в энергию электрического поля, которое генерирует колебательный процесс, аналогичный возбуждению RLC -контура. Принципиальная разница колебаний в RLC -контуре и в МОР состоит в том, что из-за высокой плотности электрической энергии в толще металла габаритные параметры МОР на несколько порядков ниже аналогичных параметров RLC -контура той же частоты собственных колебаний. Кроме этого для их возбуждения нет необходимости непосредственного включения МОР в цепь тока, так как колебания возбуждаются электромагнитным полем. Контуры МОР по отношению к RLC -контуром имеют те же преимущества, что и транзисторы перед электронными лампами, а именно миниатюризацию и незначительные энергетические затраты на модуляцию параметров. В контуре МОР объем металла определяет полосу частот его собственных колебаний. В описанном усилителе МОР выполнен в виде высокопроводного короткозамкнутого витка оптимального трансформатора напряжения, а частоту его собственных колебаний задают габаритные параметры этого короткозамкнутого витка. Методика расчета частоты собственных колебаний МОР приведена в [5].

Использование электромагнитных усилителей с МОР полосовым фильтром позволяет расширить методы обработки низкоуровневых сигналов и распространить их на область подшумовых информационных сигналов. Это делает доступным прямое наблюдение биомеханических процессов в биологических объектах.

1. *Радиоприемные* схемы на полупроводниковых приборах / Под ред. Р.А. Валитова и А.А. Кулковского. – М.: Сов. радио, 1968. – 384 с.
2. *Мигулин И.Р., Чаповский М.З.* Интегральные микросхемы в радиоэлектронных устройствах. – Киев: Техніка, 1985. – 283 с.
3. *Бех А.Д., Чернецкий В.В.* Волновая модель вихретоковых контуров в металлах // УСиМ. – 1996. – № 1/2. – С. 17–22.
4. *Бех А.Д., Чернецкий В.В.* Концепция основ физической информатики // УСиМ. – 2001. – № 1. – С. 3–5.
5. *Бех А.Д., Чернецкий В.В.* Прямое цифровое преобразование физических величин // УСиМ. – 1994. – С. 3–10.

Получено 01.04.2008